

Projektiranje uređaja za stabilizaciju broda

Šego, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:360882>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mateo Šego

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Mateo Šego

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na svojoj pomoći, susretljivosti i iskazanom povjerenju. Isto tako, zahvaljujem se studentskoj udruzi HSA-SF na ustupanju radionice i strojeva za potrebe izrade ovog rada. Također se zahvaljujem i svojim prijateljima na ustupanju usluga 3D printanja.

Na kraju, najveća zahvala ide mojim roditeljima i obitelji za povjerenje i podršku tijekom studija.

Mateo Šego



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mateo Šego** JMBAG: **0035234750**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje uređaja za stabilizaciju broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of a vessel stabilization device**

Opis zadatka:

U današnjem pomorstvu, stabilizacija broda igra ključnu ulogu u osiguravanju udobnosti putnika i sigurnosti tereta te poboljšanju upravljivosti i nosivosti plovila. Jedan od mogućih načina stabilizacije broda je upotreba žiroskopskih stabilizatora. Žiroskopi su uređaji koji koriste princip očuvanja momenta inercije kako bi održali stabilnost i orijentaciju plovila ili letjelice. Glavni cilj ovog rada je razviti učinkovit sustav stabilizacije plovila, koji koristi aktivno upravljani žiroskopski uređaj za smanjenje nagiba broda uzrokovano valovima ili bočnim silama.

U radu je potrebno:

- izraditi dinamički model sustava te načiniti simulaciju u nekom od simulacijskih alata
- izraditi maketu plovila s integriranim sustavom za stabilizaciju korištenjem žiroskopskog uređaja za smanjenje bočnog valjanja broda
- opisati korištene komponente potrebne za izradu sustava
- razvijene upravljačke algoritme ispitati na eksperimentalnom sustavu brodice te prikupljene podatke usporediti sa simulacijskim rezultatima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Željko Šitum

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Teorija broda	2
1.2. Giroskopski stabilizatori	4
2. DINAMIČKI MODEL I SIMULACIJA SUSTAVA.....	6
2.1. Dinamika broda.....	6
2.2. Dinamika giroskopa	8
2.3. Dinamika sustava	9
3. KORIŠTENE KOMPONENTE.....	12
3.1. Mikrokontroler	12
3.2. DC-DC pretvarač (eng. „step-down converter“)... ..	13
3.3. Aktuator za zakretanje giroskopa.....	14
3.4. Upravljački modul motora za zakretanje giroskopa	15
3.5. Aktuator za vrtnju zamašnjaka.....	16
3.6. Upravljački modul motora za vrtnju zamašnjaka	17
3.7. Uređaj za mjerenje kuta ljuľanja	18
4. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA MODELA	20
4.1. Konstruiranje zamašnjaka i kolijevke	21
4.1.1. Odabir ležajeva i konstruiranje osovinica.....	23
4.2. Konstruiranje vertikalnih nosača i postolja.....	25
4.3. Maketa brodice.....	28
5. IZRADA I SASTAVLJANJE MODELA	30
6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I USPOREDBA SA SIMULACIJOM.....	35
7. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39
PRILOZI.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1. Stupnjevi slobode broda [1]	2
Slika 2. Prikaz metacentra, težišta uzgona i težišta masa broda	3
Slika 3. Stupnjevi slobode giroskopa	4
Slika 4. Primjer giroskopskog stabilizatora marke Seakeeper [5]	5
Slika 5. Prikaz kuta ljuljanja broda u odnosu na vrijeme bez stabilizacije	8
Slika 6. Prikaz kuta ljuljanja broda u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom bez aktivne kontrole.....	10
Slika 7. Prikaz kuta ljuljanja broda u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom sa aktivnom kontrolom	11
Slika 8. Mikrokontroler Dasduino CORE	12
Slika 9. DC-DC pretvarač MP1584.....	13
Slika 10. Koračni motor NEMA 17	14
Slika 11. Upravljački modul motora A4988	15
Slika 12. Motor Surpass Hobby C2212-750KV.....	16
Slika 13. Elektronički kontroler brzine motora 30A	17
Slika 14. LSM6DSO modul	19
Slika 15. Prikaz glavnih dijelova modela giroskopskog stabilizatora.....	20
Slika 16. Presjek sklopa motora i zamašnjaka	21
Slika 17. Početni model kolijevke.....	22
Slika 18. Konačni model kolijevke	22
Slika 19. Ležaj SKF HK 0608 [12]	23
Slika 20. Prikaz lijeve osovinice u sklopu.....	24
Slika 21. Prikaz desne osovinice u sklopu	24
Slika 22. Početni oblik vertikalnih nosača	25
Slika 23. Prikaz ravnine sječanja vertikalnog nosača	25
Slika 24. Desni vertikalni nosač	26
Slika 25. Poklopac vertikalnog nosača.....	26
Slika 26. Raspored svih dijelova stabilizatora na postolju.....	27
Slika 27. Postolje.....	27
Slika 28. Model brodice	28
Slika 29. Model giroskopskog stabilizatora unutar modela broda	29
Slika 30. 3D printanje FDM metodom.....	30
Slika 31. Poravnavanje baza nosača.....	31
Slika 32. Poravnavanje stranica postolja.....	31
Slika 33. Bušenje rupa pomoću koordinatnog stola glodalice	32
Slika 34. Desna osovinica na tokarskom stroju.....	32
Slika 35. Tokarenje zamašnjaka.....	33
Slika 36. Proces proizvodnje pločice	33
Slika 37. Proizvedena i sastavljena pločica.....	34
Slika 38. Sastavljeni model giroskopskog stabilizatora u maketi broda	34
Slika 39. Prikaz izmjerenih i simulacijskih odziva kuta ljuljanja u odnosu na vrijeme bez stabilizacije	36
Slika 40. Prikaz izmjerenih i simulacijskih odziva kuta ljuljanja u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom bez aktivne kontrole	37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne karakteristike mikrokontrolera Dasduino CORE.....	13
Tablica 2. Karakteristike DC-DC pretvarača MP1584	14
Tablica 3. Karakteristike koračnog motora NEMA 17	15
Tablica 4. Osnovne karakteristike modula A4988	16
Tablica 5. Karakteristike motora Surpass Hobby C2212-750KV	17
Tablica 6. Karakteristike elektroničkog kontrolera brzine motora 30A.....	18
Tablica 7. Osnovne karakteristike LSM6DSO modula.....	19

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

ASSY-001	Sklop modela giroskopskog stabilizatora
PART-001	Zamašnjak
PART-002	Kolijevka
PART-003	Vertikalni nosač desni
PART-004	Vertikalni nosač lijevi
PART-005	Poklopac vertikalnog nosača
PART-006	Osovina kolijevke desna
PART-007	Osovina kolijevke lijeva
PART-008	Podloška zamašnjaka
PART-009	Postolje

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
GM	m	Metacentrična visina
φ	rad	Nagib broda (kut od vertikale)
Δ	N	Istisnina broda
g	m/s ²	Gravitacija
k_{xx}	m	Radius inercije broda oko osi naginjanja
B	/	Konstanta prigušenja
k	/	Faktor krutosti
σ_{xx}	/	Koeficijent povećanja inercije broda zbog zahvaćene vode
I_{broda}	kgm ²	Moment inercije broda oko osi ljuljanja
I_{zam}	kgm ²	Moment inercije zamašnjaka oko uzdužne osi rotacije
α	rad	Kut precesije
ω_{zam}	rad/s	Kutna brzina zamašnjaka
ω_{prec}	rad/s	Kutna brzina precesije
K	kgm ² /s	Moment količine gibanja zamašnjaka
M_{gyro}	Nm	Moment giroskopske stabilizacije

SAŽETAK

Cilj ovog rada je razviti učinkovit sustav stabilizacije plovila, koji koristi giroskopski uređaj za smanjenje nagiba broda uzrokovano valovima ili bočnim silama. Zahtjevi koje stabilizator treba ispuniti su da se amplituda kuta ljuljanja pri vanjskoj pobudi smanji za barem 50 % te da se broj oscilacija ljuljanja broda od puštanja s određenog nagiba do amplitude ljuljanja od 2 stupnja također smanji za 50 %. Ideja rada je obuhvatiti postupak projektiranja, izrade dinamičkog modela, simulacije, izrade, montaže, programiranja i testiranja giroskopskog stabilizatora smještenog u maketu broda.

U uvodu će se dati teoretske osnove pomorstvenosti broda i teoretske osnove giroskopa, a potom će se izvesti dinamički model sustava za simulaciju i provest će se simulacija u programu Matlab. Nakon toga će se opisati korištene komponente stabilizatora. Zatim slijedi prikaz tijeka konstruiranja dijelova modela u programu SolidWorks. Sama izrada modela će se prikazati u zasebnom poglavlju, isto kao i testiranja gotove makete i usporedba sa simulacijama na kraju.

Ključne riječi:

giroskopski stabilizator, maketa plovila, mehatronički sustav, simulacija

SUMMARY

The goal of this work is to develop an efficient vessel stabilization system that utilizes a gyroscopic device to reduce the ship's roll caused by waves or lateral forces. The requirements for the stabilizer are that the amplitude of the roll angle under external excitation is reduced by at least 50 %, and that the number of roll oscillations from a specific tilt angle to an amplitude of 2 degrees is also reduced by 50 %. The concept of the project encompasses the design process, dynamic model development, simulation, production, assembly, programming, and testing of the gyroscopic stabilizer installed in a ship model.

The introduction will provide the theoretical foundations of ship seakeeping and the principles of the gyroscopic stabilization, followed by the development of the dynamic model for system simulation, and the simulation will be conducted using Matlab software. After that, the components used in the stabilizer system will be described. Next, the design process for the model parts in SolidWorks will be presented step by step.. The model fabrication will be detailed in a separate chapter, as will the testing of the completed model and the final comparison with the simulations.

Key words:

gyroscopic stabilizer, ship model, mechatronic system, simulation

1. UVOD

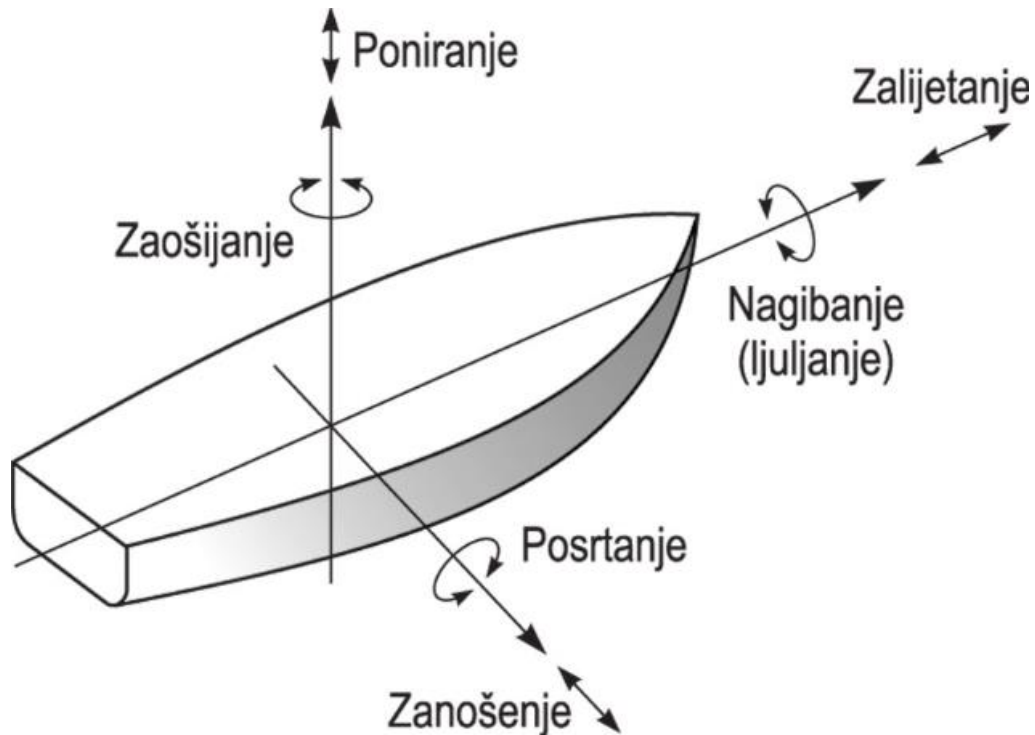
Tradicionalno, jedini faktor u stabilnosti broda bio je dizajn trupa broda. Iako je to bilo zadovoljavajuće stoljećima, razvojem tehnologije su se pojavili sustavi dodatnog stabiliteta broda. Stabilizacija brodova na valovima ključan je aspekt modernog pomorskog inženjeringa, posebno u kontekstu poboljšanja sigurnosti, udobnosti putnika i učinkovitosti plovidbe. Ljuljanje, tj. bočno njihanje broda uzrokovano morskim valovima, može značajno utjecati na sigurnost, operativne sposobnosti broda, performanse posade i ukupno iskustvo putovanja. Kako bi se smanjili ovi negativni učinci, razvijeni su različiti sustavi za stabilizaciju brodova. Ovi sustavi kombiniraju mehaničke, hidrauličke i elektroničke komponente kako bi osigurali optimalne performanse u raznim uvjetima na moru.

Danas postoji širok spektar stabilizacijskih sustava koji se mogu primijeniti na različitim vrstama plovila, od malih rekreativnih brodova do velikih komercijalnih i luksuznih jahti. Sustavi za stabilizaciju mogu se podijeliti prema nekoliko kriterija. Postoje sustavi koji se montiraju izvana, poput stabilizacijskih krilca, i oni koji se montiraju unutar trupa broda, poput stabilizacijskih spremnika i giroskopskih stabilizatora. Svaka od ovih opcija ima svoje prednosti i mane te se bira prema specifičnim potrebama i karakteristikama plovila. Stabilizacijski sustavi mogu biti jednostavni ili složeni. Jednostavni sustavi često koriste pasivne metode stabilizacije, oslanjajući se na prirodne sile i kretanje broda, dok složeni sustavi koriste aktivne komponente poput senzora, aktuatora i naprednih upravljačkih sustava kako bi dinamički reagirali na promjene u morskim uvjetima.

Tema ovog rada je izrada modela brodice s giroskopskim sustavom stabilizacije pri čemu je cilj da se amplituda kuta ljuljanja pri vanjskoj pobudi smanji za barem 50 % te da se broj oscilacija ljuljanja broda od puštanja s određenog nagiba do amplitude ljuljanja od 2 stupnja također smanji za 50 %.

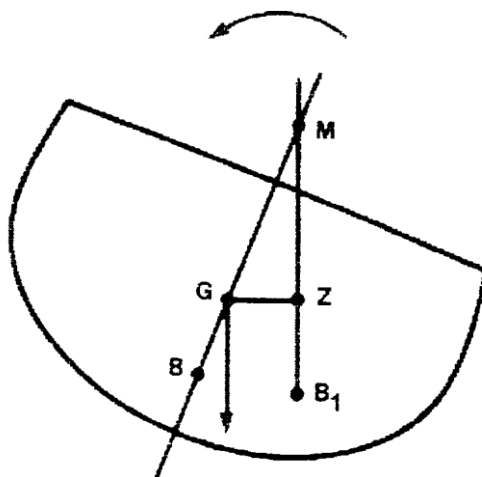
1.1. Teorija broda

Kao što se vidi na slici 1, brod ima 6 stupnjeva slobode od kojih je za ovaj rad najbitniji rotacijski stupanj slobode oko uzdužne osi broda kojeg nazivamo ljuljanje ili valjanje.



Slika 1. Stupnjevi slobode broda [1]

Prirodne frekvencije broda su ključni parametri u razumijevanju ponašanja plovila na moru, posebno kada je riječ o ljuljanju (bočnom valjanju) i stabilitetu. Ove frekvencije predstavljaju osnovne oscilacije broda kada je izložen vanjskim silama, kao što su valovi. Svaki brod ima svoju jedinstvenu prirodnu frekvenciju koja ovisi o njegovim fizičkim karakteristikama kao što su masa, oblik trupa, raspodjela težine i metacentrična visina.



Slika 2. Prikaz metacentra, težišta uzgona i težišta masa broda

Primjer metacentra se može vidjeti na slici 2., zajedno sa težištem uzgona B odnosno B1 u nagnutom stanju, težištem masa s oznakom G, te metacentrom označenim s M.

Metacentrična visina GM ima ključnu ulogu u stabilitetu broda. Veća metacentrična visina znači veću stabilnost i brže oscilacije, dok manja metacentrična visina znači sporije oscilacije i potencijalno manje stabilan brod.

Prirodna frekvencija ljujanja broda odnosi se na brzinu kojom brod oscilira oko svoje longitudinalne osi u odgovoru na bočne sile. Problem nastaje kada se prirodna frekvencija ljujanja broda približi frekvenciji valova. U takvim uvjetima, može doći do fenomena poznatog kao rezonancija, gdje se amplitude ljujanja povećavaju, što može dovesti do opasnih uvjeta za plovidbu. Kako bi se to spriječilo, koriste se razni stabilizacijski sustavi.

Razumijevanje prirodnih frekvencija ljujanja broda ključno je za dizajn učinkovitih sustava stabilizacije.

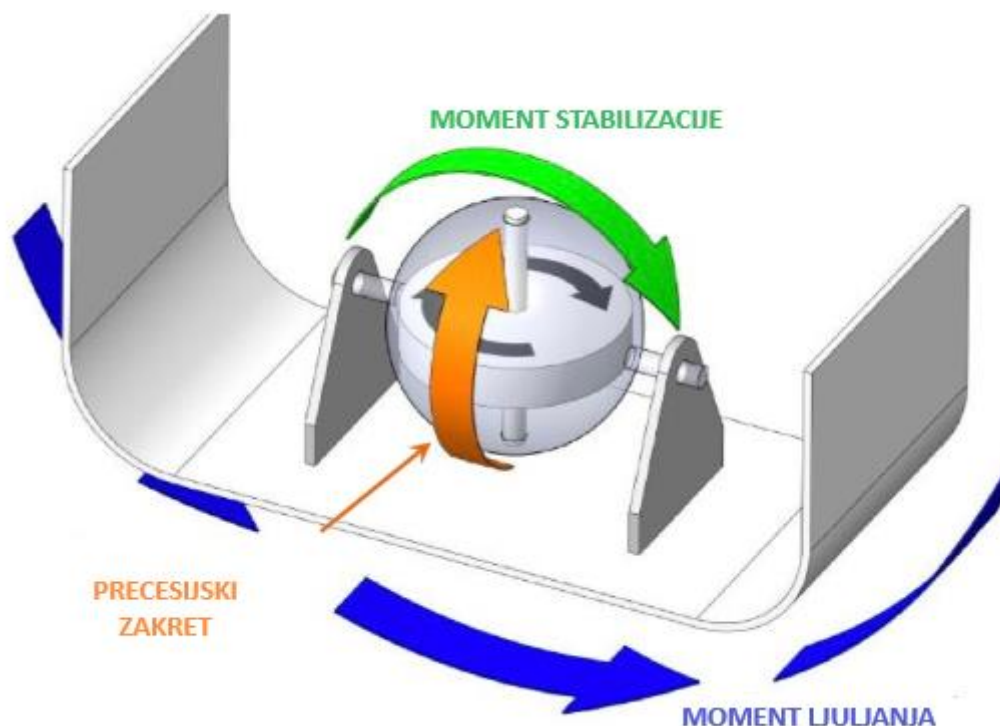
Fazno kašnjenje odnosi se na vremensko kašnjenje između trenutka kada brod počne valjati i trenutka kada stabilizacijski sustav postigne svoj maksimalni stabilizirajući učinak. Najčešće je idealno fazno kašnjenje za stabilizaciju broda ono od 90 stupnjeva. To znači da kada je brod na maksimalnom nagibu u jednu stranu, stabilizacijski sustav treba biti na svojoj srednjoj poziciji, spreman da se suprotstavi povratnom kretanju broda.

Fazno kašnjenje i prirodna frekvencija broda su međusobno povezani i bitni za učinkovitost stabilizacijskih sustava. Usklađivanjem faznog kašnjenja s prirodnom frekvencijom, stabilizacijski sustavi mogu maksimalno smanjiti valjanje broda, poboljšavajući tako sigurnost i udobnost plovidbe. [2]

1.2. Giroskopski stabilizatori

Giroskopski stabilizatori su sofisticirani uređaji koji koriste principe inercije i precesije kako bi generirali sile koje se suprotstavljaju valjanju broda.

Giroskopski stabilizatori se sastoje od rotora (zamašnjaka), kućišta, motora i aktuatora, senzora i upravljačke jedinice. Stupnjevi slobode i princip rada giroskopa su prikazani na slici 3.



Slika 3. Stupnjevi slobode giroskopa

Rotor je teški disk ili cilindar (objekt s velikim momentom tromosti) koji se vrti velikom brzinom. Postoje i verzije ovih uređaja s tekućim medijem koji oponaša rotor. Ono što je zajedničko svakom rotoru je da je on glavni izvor inercije u sustavu. Rotor je smješten unutar kućišta koje ga štiti, omogućuje njegovo pričvršćenje na brod i dozvoljava da se rotor istovremeno vrti oko svoje vertikalne i horizontalne osi okomite na uzdužnu os broda. Za pokretanje i vrtnju rotora se može koristiti bilo koji tip motora, a za kontroliranje nagiba rotora se osim motora mogu koristiti i razni aktuatori kao što su pneumatski ili hidraulični.

Stabilnost giroskopa se ogleda u tome što se snažno suprotstavlja svim vanjskim utjecajima koji teže da mu promjene položaj osi. Precesija je ključni koncept u razumijevanju kako giroskopski stabilizatori rade na smanjenju ljuljanja broda. Pod precesijom podrazumijevamo osobinu

giroskopa da pri nasilnoj promjeni položaja jedne njegove osi skreće oko druge, njoj okomite osi. Precesija je bolje rečeno rezultat pokušaja giroskopa da očuva svoj kutni moment, što rezultira stvaranjem sile okomite na smjer primijenjene sile.

Preneseno na stvarni model, uslijed nagnjanja broda zbog vala, senzor to očitava i preko upravljačke jedinice se generira signal za potrebni precesijski zakret kako bi se stvorio potrebni moment za stabilizaciju. Potom aktuator rotira zamašnjak oko horizontalne osi okomite na uzdužnu os broda stvarajući precesijski pokret koji generira silu okomitu na smjer ljuljanja te se tako brod stabilizira. Što je veći uzbudni moment aktuatora, veća je i sila otpora giroskopa prema vanjskom utjecaju, a u ovom slučaju i veća mogućnost smanjenja ljuljanja. [4] Na slici 4. se vidi primjer giroskopskog stabilizatora proizvođača Seakeeper.



Slika 4. Primjer giroskopskog stabilizatora marke Seakeeper [5]

Veličina giroskopskog stabilizatora (zamašnjaka) se određuje preko potrebnog momenta koji stabilizator mora moći stvoriti kako bi ublažio ljuljanje. Valovi stvaraju moment koji djeluje na trup broda i uzrokuje ljuljanje. Upravo taj moment se uzima kao minimalni moment koji giroskopski stabilizator mora stvoriti. Iz tog podatka, uz brzinu vrtnje zamašnjaka i brzinu precesijskog zakreta, može se odrediti potrebna veličina zamašnjaka.

2. DINAMIČKI MODEL I SIMULACIJA SUSTAVA

2.1. Dinamika broda

U stvarnosti je gibanje broda vrlo složeno za modeliranje, a u nekim slučajevima zahtijeva skup od šest povezanih diferencijalnih jednadžbi koje i dalje "počivaju na pojednostavljenim pretpostavkama." [2, str. 500].

Za ovaj projekt je potrebno analizirati samo gibanje ljuljanja, pa to uveliko olakšava postupak. Iz razloga što će se maketa testirati u običnoj posudi s vodom, bez uređaja za stvaranje pravilnih valova, sustav će se simulirati tako da brod slobodno pluta u mirnoj vodi kada ga iznenada uznemiri neki poremećaj odnosno kada ga rukom nagnemo na željeni kut te pustimo da se stabilizira.

Neka φ bude nagib broda u odnosu na okomitu liniju u bilo kojem trenutku. Moment koji djeluje na stabilan brod bit će takav da smanjuje φ . Za male vrijednosti φ , moment je proporcionalan:

$$moment = -\Delta \cdot GM \cdot \varphi, \quad (1)$$

pri čemu Δ označava istisninu broda, GM označava metacentričnu visinu, a φ označava kut od vertikale.

Primjenjujući Newtonove zakone gibanja koji glase:

$$moment = moment\ tromosti\ (I) \cdot\ kutno\ ubrzanje\ (\ddot{\varphi}), \quad (2)$$

te uvrštavanjem jednadžbe (1) u jednadžbu (2), imamo:

$$-\Delta \cdot GM \cdot \varphi = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 \ddot{\varphi}, \quad (3)$$

gdje g označava gravitaciju, a k_{xx} radijus inercije broda oko osi nagnjanja.

Kada uzmemo u obzir najjednostavnije prigušenje i povećanje inercije broda zbog zahvaćene vode, jednadžba za nagnjanje broda u mirnoj vodi postaje:

$$\frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 (1 + \sigma_{xx}) \ddot{\varphi} + B \dot{\varphi} + \Delta \cdot GM \cdot \varphi = 0, \quad (4)$$

u kojoj B predstavlja konstantu prigušenja (zbog otpora kotrljanja uslijed trenja vode, viskoznosti ili drugih čimbenika) a σ_{xx} predstavlja koeficijent povećanja inercije broda i obično iznosi između 0 i 0.3 u ovisnosti o veličini broda, obliku trupa i sličnim faktorima. [2, str. 488]

Iz razloga što je za rješavanje ove jednadžbe potrebno puno podataka o brodu koji su u ovom slučaju nepoznati i ne mogu se lako odrediti bez detaljnih ispitivanja te kako to nije tema ovog rada, za simuliranje ovog slučaja će se uvesti daljnja pojednostavljenja.

Znajući da se moment tromosti može zapisati kao:

$$I_{broda} = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2, \quad (5)$$

te uvrštavanjem jednadžbe (5) u jednadžbu (4), dobija se:

$$I_{broda}(1 + \sigma_{xx})\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + \Delta \cdot GM \cdot \varphi = 0. \quad (6)$$

Isto tako za moment tromosti vrijedi:

$$I_{efektivni} = I_{broda}(1 + \sigma_{xx}), \quad (7)$$

pa se jednadžba (6) može zapisati u sljedećem obliku:

$$I_{efektivni}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + \Delta \cdot GM \cdot \varphi = 0. \quad (8)$$

Budući da manji brodovi sa oblikom trupa na koje slični trup broda iz ovoga rada imaju iznos koeficijenta povećanja inercije broda u rasponu od 0.01 do 0.1, zbog jednostavnosti će se pretpostaviti da vrijedi:

$$I_{efektivni} \approx I_{broda}. \quad (9)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (9) u (8), dobija se sljedeći izraz za naginjanje broda:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + \Delta \cdot GM \cdot \varphi = 0. \quad (10)$$

Može se primjeniti da je ovo zapravo standardna linearna diferencijalna jednadžba drugog reda koja opisuje prigušeni harmonijski oscilator.

Zbog jednostavnijeg pisanja, još se uvodi jednakost:

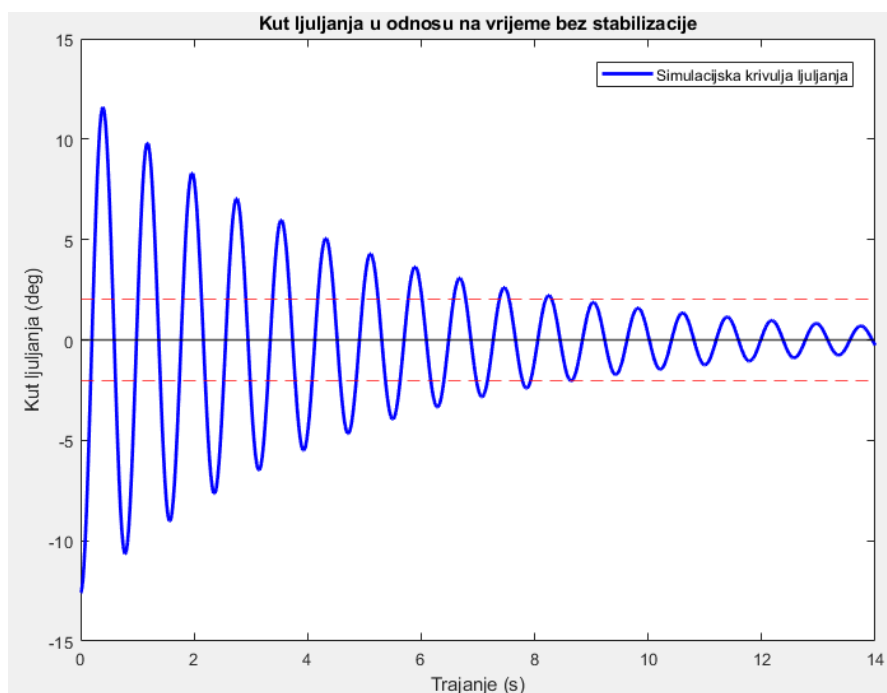
$$\Delta \cdot GM = k, \quad (11)$$

pa jednadžba za naginjanje broda postaje:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + k\varphi = 0, \quad (12)$$

gdje I_{broda} označava moment tromosti broda oko osi nagnjanja, B označava konstantu prigušenja, a k označava koeficijent krutosti ili povratnog momenta.

Nakon što se ta diferencijalna jednadžba ubaci u Matlab i simulira, dobije se krivulja koja oponaša smirivanje ljuľanja broda od 13 stupnjeva nagiba. Krivulja se može vidjeti na slici 5.



Slika 5. Prikaz kuta ljuľanja broda u odnosu na vrijeme bez stabilizacije

Sa slike je vidljivo kako je bilo potrebno 11 oscilacija broda prije nego li se amplituda ljuľanja smirila ispod 2 stupnja. Ova činjenica će biti korisna kasnije za usporedbu sa stvarnim modelom.

2.2. Dinamika giroškopa

Ako se rotirajućem zamašnjaku doda kutna brzina s pomoću para sila koje djeluju na ležajeve rotacije (precesijski zakret, α), nastala brzina rotacije (ne primijenjeni moment, nego rezultirajuća brzina rotacije) stvara ili inducira moment u ravnini koja sadrži os rotacije i okomita je na ravninu primijenjenog momenta. Tako se čini da je primijenjeni moment savijen za 90° . Međutim, odnos je specifično između brzine precesije (ω_{prec}), momenta količine gibanja zamašnjaka (K) i proizvedenog momenta žiroškopa (M_{gyro}).

Taj odnos je elegantno jednostavan i može se matematički zapisati na sljedeći način [3]:

$$\text{moment giroskopa } (M_{gyro}) = \text{moment količine gibanja zamašnjaka } (K) \cdot \text{brzina precesije } (\omega_{prec}). \quad (13)$$

Moment količine gibanja zamašnjaka koji se vrti konstantnom brzinom se računa pomoću sljedećeg izraza:

$$K = I_{zam} \cdot \omega_{zam}, \quad (14)$$

gdje I_{zam} označava moment tromosti zamašnjaka oko osi rotacije, a ω_{zam} označava brzinu rotacije zamašnjaka ili kutnu brzinu.

Potrebni moment giroskopa se obično određuje tako da bude isti ili veći od momenta ljuljanja broda, tako da bi imao dovoljno „snage“ da stabilizira ljuljanje. Moment giroskopa osim o veličini i brzini zamašnjaka ovisi i o brzini precesijskog zakreta ($\dot{\alpha}$) tj. brzini aktuatora pa konačan izraz za moment giroskopskog stabilizatora glasi [8]:

$$M_{gyro} = I_{zam} \cdot \omega_{zam} \cdot \dot{\alpha}. \quad (15)$$

U slučaju giroskopskog stabilizatora bez aktivne kontrole, brzina precesijskog zakreta je jednaka brzini ljuljanja broda:

$$\dot{\alpha} = \dot{\varphi}. \quad (16)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (16) i (14) u (13), dobije se konačan izraz za moment giroskopskog stabilizatora bez aktivne kontrole koji glasi:

$$M_{gyro} = I_{zam} \cdot \omega_{zam} \cdot \dot{\varphi}. \quad (17)$$

2.3. Dinamika sustava

Giroskopski stabilizator obično pruža dodatni učinak prigušenja koji pomaže u smanjenju ljuljanja. Diferencijalna jednadžba sustava sa stabilizacijom se može zapisati na sljedeći način:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + k\varphi = -M_{gyro}. \quad (18)$$

Kada se u to doda jednadžba (17), izraz za dinamiku sustava bez aktivne kontrole glasi:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + k\varphi = -I_{zam}\omega_{zam}\dot{\varphi}, \quad (19)$$

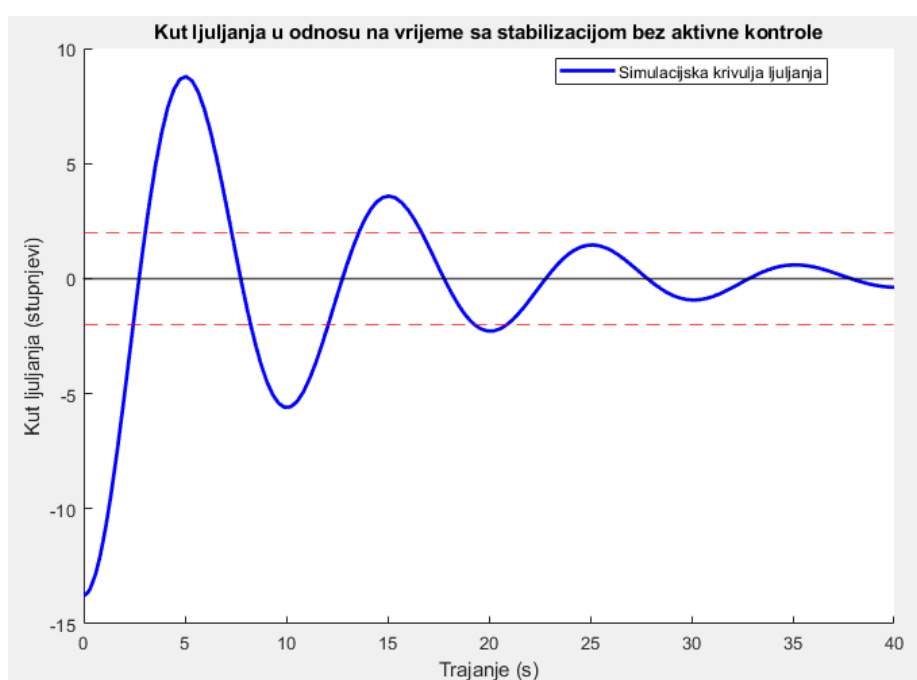
što se može zapisati u drugačijem, konačnom obliku:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + (B + I_{zam}\omega_{zam})\dot{\varphi} + k\varphi = 0. \quad (20)$$

U slučaju aktivne kontrole, ubacivanjem jednadžbe (15) u (18), dobije se:

$$I_{broda}\ddot{\varphi} + B\dot{\varphi} + k\varphi = -I_{zam}\omega_{zam}\dot{\alpha}, \quad (21)$$

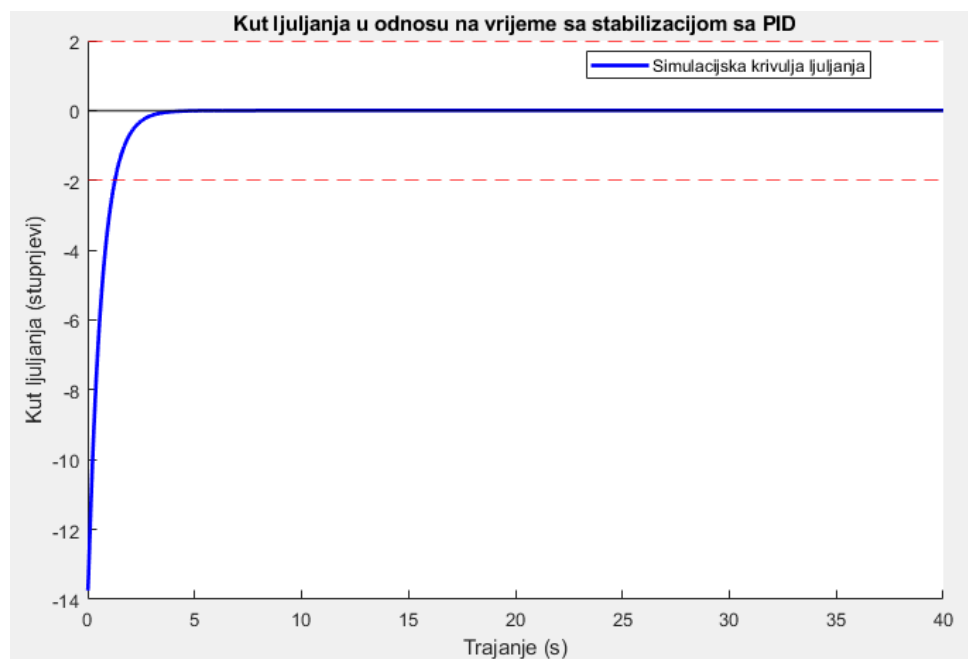
Simuliranjem sustava sa giroskopskim stabilizatorom bez aktivne kontrole (20), dobije se krivulja smirivanja kuta ljujanja koja je prikazana na slici 6.



Slika 6. Prikaz kuta ljujanja broda u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom bez aktivne kontrole

Iz slike je vidljivo da se već s giroskopskim stabilizatorom bez aktivne kontrole broj oscilacija smanjio na svega 2 što već zadovoljava cilj ovoga rada.

U slučaju da se koristi giroskopski stabilizator s aktivnom kontrolom kuta precesijskog zakreta koji je reguliran PID regulatorom, krivulja smirivanja kuta ljujanja broda bi trebala izgledati kako je prikazano na slici 7.



Slika 7. Prikaz kuta ljuljanja broda u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom sa aktivnom kontrolom

Ovakva krivulja je najpoželjnija za stabilizaciju broda jer je dovoljno brza a ne dozvoljava nikakve oscilacije što puno znači za udobnost putnika.

3. KORIŠTENE KOMPONENTE

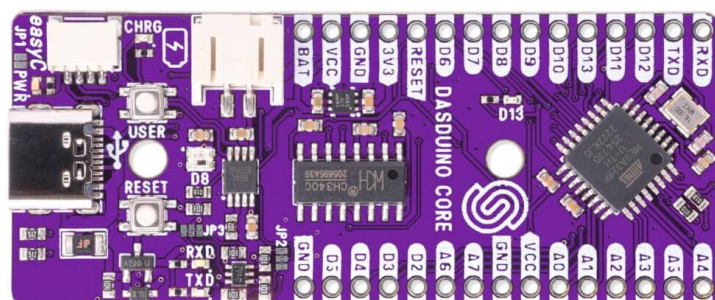
3.1. Mikrokontroler

Korišteni mikrokontroler je Dasduino CORE, mikrokontroler razvijen i proizveden u Hrvatskoj. To je uređaj koji se temelji na Atmel ATmega328P čipu i raspolaže s 22 ulazno/izlazna pina, od kojih 6 može proizvesti širinsko – impulsni signal, 14 je digitalnih, a 8 analognih pinova. Uređaj ima mogućnost za UART, SPI i I2C komunikaciju.

Ulazni napon uređaja je 1.8-5.5 V, a na pločici se također nalazi 3.3 V regulator napona za jednostavno napajanje perifernih uređaja. Može se napajati preko USB Type-C konektora ili preko konektora za litij-ionsku bateriju.

Uređaj sadrži easyC konektor koji omogućuje jednostavno povezivanje između različitih uređaja koji koriste I2C komunikaciju i koji su napravljeni od strane istog proizvođača. Mikrokontroler ima 32 kB flash memorije za pohranu koda, 2 kB SRAM-a (statički RAM) i 1 kB EEPROM-a (engl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, hrv. električno izbrisiva programabilna ispisna memorija) koja se može čitati i pisati.

U tablici 1. prikazane su osnovne karakteristike mikrokontrolera, dok je na slici 8. prikazan korišteni mikrokontroler.



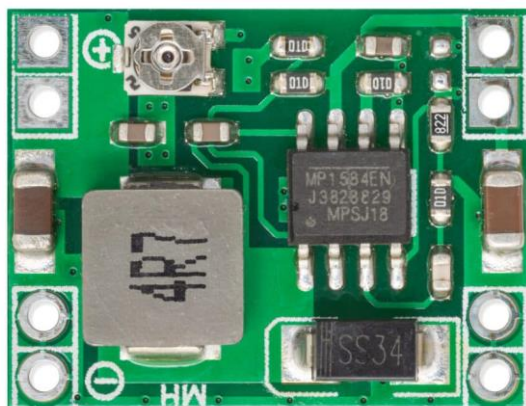
Slika 8. Mikrokontroler Dasduino CORE

Tablica 1. Osnovne karakteristike mikrokontrolera Dasduino CORE

Osnovne karakteristike Dasduino CORE	
Mikrokontroler	Atmel ATmega328P
Ulazni napon	1.8-5.5 V
Digitalni ulazi/izlazi	14
Analogni ulazi/izlazi	8
DC struja po pojedinačnom pinu	40 mA
DC struja za 5V pin	200mA
Flash memorija	32 kB
EEPROM memorija	1 kB
SRAM memorija	2 kB
Duljina	63 mm
Širina	22 m

3.2. DC-DC pretvarač (eng. „step-down converter“)

Budući da se stabilizator napaja s akumulatora napona 12 V, a za napajanje mikrokontrolera i upravljačkih modula motora treba napon od 5 V, za snižavanje napona je odabran MP1584 modul koji koristi ulazni napon u rasponu 4.5-28 V i pretvara ga u napone raspona 0.8-20 V uz maksimalnu struju od 3 A što je i više nego dovoljno za pogon korištenih uređaja. Ovaj modul ulazni napon snižava na točno određeni izlazni napon koji se podešava putem trimera na pločici. Vrlo je praktičan jer promjenom ulaznog napona, izlazni ostaje uvijek isti. Modul je vidljiv na slici 9., a u tablici 2. su vidljive njegove karakteristike.

**Slika 9. DC-DC pretvarač MP1584**

Tablica 2. Karakteristike DC-DC pretvarača MP1584

DC-DC pretvarač MP1584	
Ulazni napon	4.5-28 V
Izlazni napon	0.8-20 V
Max. struja izlaza	3 A
Efikasnost	do 96%
Duljina	22 mm
Širina	17 mm
Visina	4 mm

3.3. Aktuator za zakretanje giroskopa

Za izvođenje precesijskog pokreta giroskopskog stabilizatora se koristi bi-polarni koračni motor NEMA 17. Koračni motor, koji je prikazan na slici 10, je vrsta električnog motora koji se koristi za precizne i kontrolirane pokrete u raznim mehatroničkim sustavima. Radi na principu digitalnih impulsa koji pokreću rotaciju motora u diskretnim koracima. Svaki impuls zakreće motor za određeni kut, što mu omogućuje preciznu kontrolu položaja i brzine rotacije.

**Slika 10. Koračni motor NEMA 17**

Navedeni princip rada čini koračne motore korisnima za primjene gdje je potrebna visoka preciznost i kontrola, pa ga se često može naći u CNC strojevima i 3D printerima. Prednosti koračnih motora su visoka preciznost i kontrola, jednostavno upravljanje, linearnost pokreta i niska cijena.

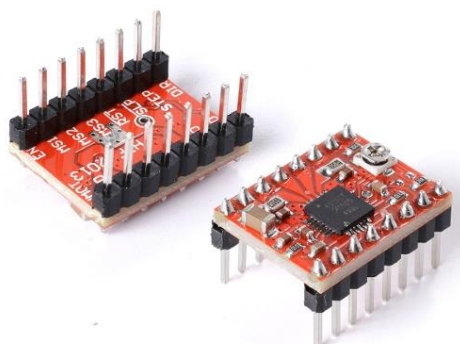
Također, koračni motori ne zahtijevaju dodatne senzore za mjerenje položaja, jer se koraci računaju putem impulsa. Preciznost koračnih motora se može mijenjati po potrebi putem upravljanja u polukoraku ili čak četvrtini koraka. Upravo to su razlozi zašto je ovaj tip motora odabran za ovaj projekt, a ova veličina je odabrana zbog sigurnosti da će motor imati dovoljno momenta za zakretanje giroskopa. Karakteristike koračnog motora NEMA 17 su prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Karakteristike koračnog motora NEMA 17

NEMA 17 koračni motor	
Korak	1.8° / korak
Radni napon	12 V
Nazivna struja	1.2 A / faza
Zakretni moment	32 Ncm
Promjer osovine	5 mm
Veličina motora	42.3 x 42.3 x 40 mm
Masa motora	280 gr

3.4. Upravljački modul motora za zakretanje giroskopa

Za upravljanje koračnim motorima se trebaju koristiti posebni moduli (eng. „driveri“). Za ovaj projekt je odabran modul A4988, prikazan na slici 11., zato što radi na odgovarajućem naponu od 12 V i može davati dovoljnu struju za pokretanje NEMA 17 koračnog motora, a uz to je i kompaktan i jeftin.



Slika 11. Upravljački modul motora A4988

Princip rada modula je generiranje koraka rotacije motora s pomoću pulsiranja struje kroz njegove namotaje. Uređaj prima signale od mikrokontrolera, a zatim ih pretvara u odgovarajuće strujne impulse potrebne za rotaciju motora. Koračni motor je s 4 žice spojen na upravljački modul, a u upravljački modul dolaze masa, +5 V, +12 V i 2 signala s mikrokontrolera od kojih jedan kontrolira smjer vrtnje motora a drugi samo pokretanje. Karakteristike korištenog upravljačkog modula su prikazane u tablici 4.

Tablica 4. Osnovne karakteristike modula A4988

Upravljački modul motora A4988	
Ulazni napon	8-35 V
Napon logike	3-5.5 V
Nazivna struja	1 A / fazi

3.5. Aktuator za vrtnju zamašnjaka

Od aktuatora za vrtnju zamašnjaka se očekuje da može zavrtjeti zamašnjak i da ga može konstantno držati na velikom broju okretaja, a da je uz to malih dimenzija i da radi na naponu od 12 V. Zbog tih kriterija izabran je istosmjerni sinkroni električni motor bez četkica (BLDC) koji se koristi za modele aviona s daljinskim upravljanjem. Ovi motori su specifični po tome što imaju veliku snagu i zakretni moment uz jako male dimenzije samog motora. Odabrani motor je Surpass Hobby C2212-750KV, prikazan na slici 12.



Slika 12. Motor Surpass Hobby C2212-750KV

Ovaj elektromotor s 14 polova radi na naponima od 7.5-15 V i može dati snagu od čak 270 W uz dimenzije od samo 28 x 26 mm i masu od svega 57 g.

Izlazna osovina mu je promjera 3 mm a maksimalna struja 18 A. Oznaka 2212 se odnosi na dimenzije rotora motora koji ima promjer 22 mm i duljinu 12 mm. Drugi dio oznake motora je povezan s brzinom vrtnje, a veza je ta da je broj okretaja motora jednak umnošku KV faktora i napona na kojem motor radi. U ovom slučaju to znači da uz radni napon od 12 V i KV faktor motora 750, maksimalni broj okretaja motora iznosi 9000 okretaja/min. Karakteristike korištenog motora su prikazane u tablici 5.

Tablica 5. Karakteristike motora Surpass Hobby C2212-750KV

Elektromotor Surpass Hobby C2212-750KV	
Radni napon	7.5-15 V
Max. struja	18 A
Max. snaga	270 W
Promjer tijela	28 mm
Duljina	26 mm
Promjer osovine	3 mm
Masa	57 gr

3.6. Upravljački modul motora za vrtnju zamašnjaka

Kako bi mogli kontrolirati vrtnju korištenog BLDC motora, treba nam elektronički kontroler brzine (ESC). Njegova glavna funkcija je pretvaranje signala iz upravljačkog sustava (npr. iz mikrokontrolera ili RC prijemnika) u odgovarajuće signale koji će pokrenuti motor na željenoj brzini. ESC prima signal iz upravljačkog uređaja, obično kao PWM (Pulse Width Modulation) signal. Promjenom frekvencije i širine PWM signala koji se šalje na motorne faze se kontrolira brzina motora. Povećanjem ili smanjenjem PWM signala, ESC kontrolira napon koji dolazi na motor i time brzinu rotacije. Primjer elektroničkog kontrolera brzine je vidljiv na slici 13.



Slika 13. Elektronički kontroler brzine motora 30A

BLDC motori koriste trofazne izmjenične signale (AC), dok većina napajanja (npr. baterije) daje istosmjerni napon (DC). ESC pretvara taj DC napon u trofazne AC signale s pomoću tranzistora, stvarajući odgovarajuće napajanje za svaki od namotaja motora. Za razliku od četkastih motora, BLDC motori nemaju četkice koje bi mehanički mijenjale smjer struje. Umjesto toga, ESC upravlja fazama motora elektronički, uključujući i isključujući napajanje svake faze u odgovarajućem redosljedu. Time se stvara rotirajuće magnetsko polje koje pokreće rotor.

Na ESC se dovodi +12 V i masa iz baterije, +5 V i masa te signalna žica s mikrokontrolera preko koje mikrokontroler šalje PWM signale u ESC i tako upravlja motorom. Karakteristike korištenog kontrolera brzine motora su prikazane u tablici 5.

Tablica 6. Karakteristike elektroničkog kontrolera brzine motora 30A

Elektronički kontroler brzine (ESC)	
Radni napon	7.5-15 V
Kontinuirana struja izlaza	30 A
Napon logike	5 V
Struja logike	2 A
Dimenzije	43 x 25 x 8 mm

3.7. Uređaj za mjerenje kuta ljuljanja

Senzor koji se koristi za određivanje kuta ljuljanja nije direktno senzor nagiba već se koristi senzor koji mjeri ubrzanje i kutnu brzinu u 6 osi pa se iz toga računski određuje kut zakreta. Korišteni modul je LSM6DSO 6-DOF koji može mjeriti kretanje u šest osi — tri linearne osi (akcelerometar) i tri rotacijske osi (giroskop). Akcelerometar mjeri ubrzanje u tri smjera (x, y, z), uključujući gravitacijsko ubrzanje, a giroskop mjeri kutnu brzinu (brzinu rotacije) oko tri osi (x, y, z).

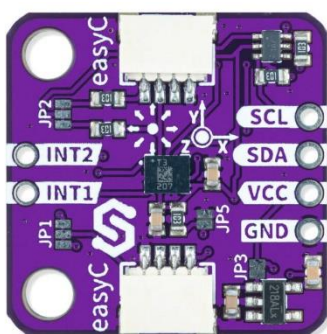
Konačni kut ljuljanja (nagib oko osi x) izračunava se kombiniranjem podataka s akcelerometra i žiroskopa putem komplementarnog filtra.

Akcelerometar mjeri ubrzanje duž osi y i z te na temelju tih podataka izračunava kut ljuljanja s pomoću funkcije atan2 , koja računa \tan^{-1} od omjera komponenti ubrzanja osi y i z. Ovaj kut izračunat akcelerometrom predstavlja trenutni nagib uređaja, ali je sklon greškama uslijed kratkotrajnih ubrzanja (npr. vibracija).

Giroskop mjeri kutnu brzinu oko x osi, a kut ljuljanja izračunava se integriranjem kutne brzine giroskopa tijekom vremena. Ovaj izračun giroskopom daje relativnu promjenu kuta tijekom vremena, koja je vrlo precizna na kratkim vremenskim intervalima, ali može akumulirati pogreške kroz duže periode.

Za kraj se koristi komplementarni filter koji koristi oba senzora kako bi kombinirao prednosti akcelerometra i giroskopa. Ovaj postupak pomaže da se pogreške akumulirane od strane giroskopa isprave s pomoću podataka iz akcelerometra, dok se istovremeno smanjuje utjecaj kratkotrajnih smetnji na akcelerometru.

LSM6DSO modul, vidljiv na slici 14., nudi mjerenja razlučivosti do ± 16 g (akcelerometar) i ± 2000 dps (giroskop). Modul je s mikrokontrolerom povezan preko easyC konektora, što omogućuje brzo i sigurno povezivanje i komunikaciju putem I2C veze bez straha od pogrešnog spajanja. Radi na rasponu napona od 1.71-3.6 V i ima dimenzije od svega 22 x 22 mm.



Slika 14. LSM6DSO modul

Tablica 7. Osnovne karakteristike LSM6DSO modula

Giroskop i akcelerometar LSM6DSO 6-DOF modul	
Radni napon	1.71-3.6 V
Raspon mjerenja akcelerometra	$\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$ g
Raspon mjerenja giroskopa	$\pm 125 / \pm 250 / \pm 500 / \pm 1000 / \pm 2000$ dps
Dimenzije	22 x 22 mm

4. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA MODELA

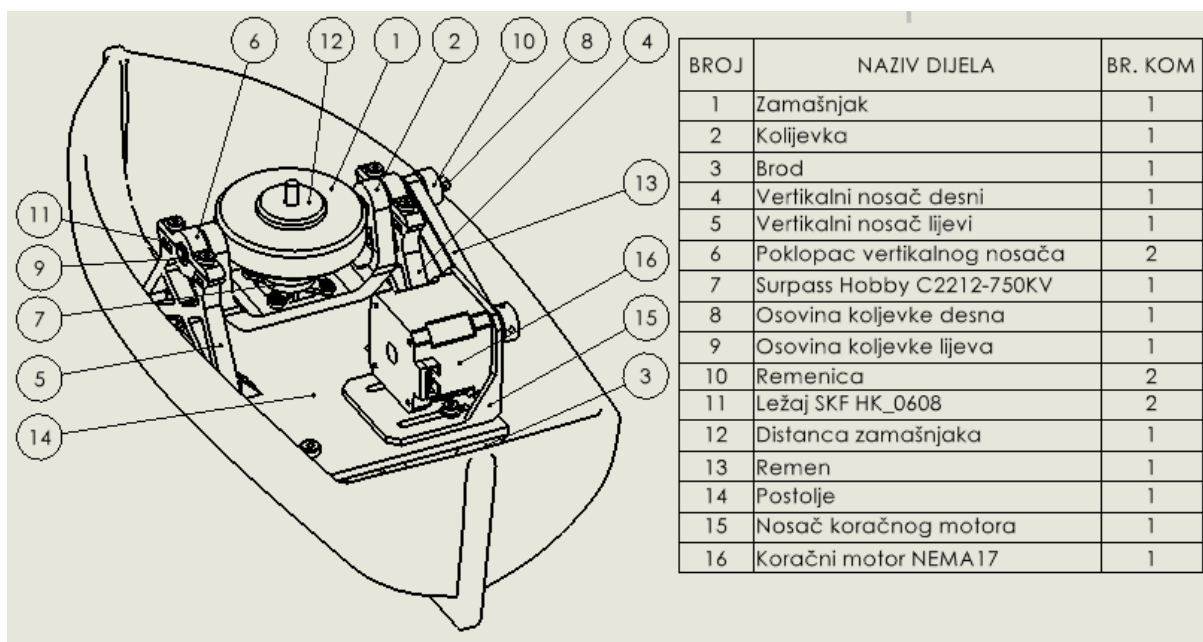
Kako bi se moglo započeti s konstruiranjem, prvo je potrebno odrediti neka ograničenja i početne uvjete te uzeti u obzir dostupne proizvodne tehnologije i dostupne materijale.

Najvažniji početni uvjet je veličina zamašnjaka koja određuje veličinu svih dijelova, a ujedno mora biti i usklađena sa snagom i veličinom korištenog motora pa je kao početni uvjet određeno da zamašnjak bude promjera 60 mm.

Sklop mora imati čim manje ukupne dimenzije uz poštovanje određene veličine zamašnjaka, kupovnih dijelova i funkcionalnosti.

Svi dijelovi giroskopskog stabilizatora moraju biti na zajedničkom postolju kako bi sustav mogao biti prenosiv i funkcionalan bez obzira na koji model je montiran.

U ovom poglavlju su prikazani postupci konstruiranja modela u programskom alatu SolidWorks. Model je sastavljen od više dijelova, a na slici 15. vide se osnovni dijelovi mehaničke konstrukcije sklopa. Dijelovi sustava označeni su brojevima od jedan do šesnaest.



Slika 15. Prikaz glavnih dijelova modela giroskopskog stabilizatora

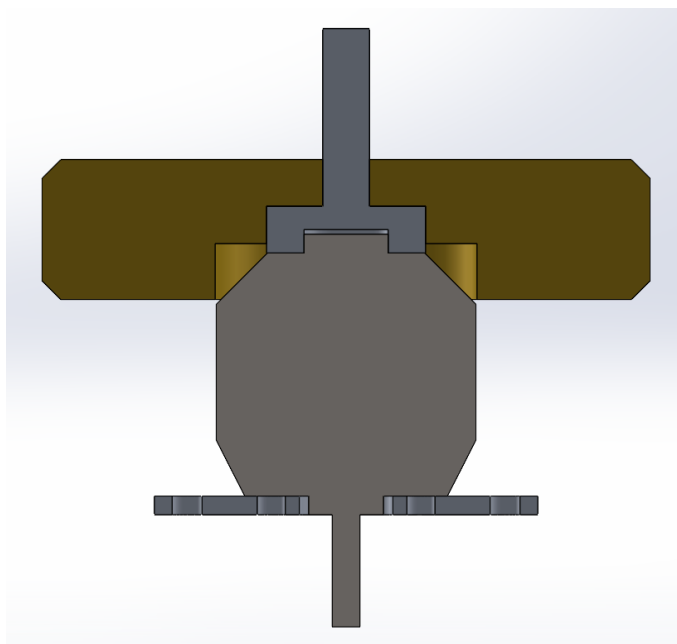
Glavni materijali koji će se koristiti za izradu modela su aluminij, mjed i polimerni materijali. Prednosti aluminija su dobra mehanička svojstva uz relativno nisku gustoću i laganu obradu na strojevima.

Mjed je izabran zbog veće gustoće zajedno sa dobrom obradljivosti za dijelove koji trebaju imati veću masu. Prednosti polimera su njihova mala gustoća te jednostavnost i brzina izrade 3D printanjem.

Dostupne proizvodne tehnologije autoru u vrijeme projektiranja rada su glodanje, tokarenje, FDM printanje i SLA printanje. Kod izrade će nedvojbeno biti potrebno tokarenje i glodanje, ali nastojat će se većinu dijelova ipak izraditi 3D printanjem zbog jednostavnosti, brzine proizvodnje i mogućnosti za ostvarivanje složenih geometrija.

4.1. Konstruiranje zamašnjaka i kolijevke

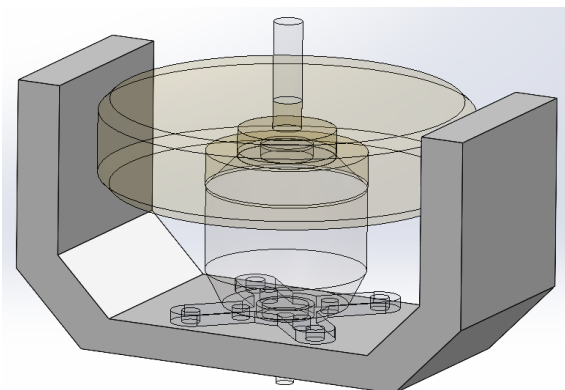
Konstruiranje zamašnjaka započinje od početnog uvjeta da mora imati promjer od 60 mm. Materijal koji je odabran za izradu zamašnjaka je mjed jer ima veću gustoću od aluminijsa i zbog estetskih razloga zbog toga što je to najupečatljiviji dio sklopa. Nakon toga se određuje potrebna debljina zamašnjaka kako bi imao dostatnu masu. U ovom slučaju debljina iznosi 15 mm što rezultira masom od 375 gr. Kako bi se zamašnjak mogao prihvatiti na motor, sredina zamašnjaka se mora izdubiti prema dimenzijama motora. Zamašnjak se na motor priteže preko matice i navoja na izlaznom vratilu motora, a centriraju se preko toleriranog provrta koji naliže na prihvat na motoru. Za kraj se dodaju skošenja na rubove zbog estetskih i sigurnosnih razloga. Presjek sklopa motora i zamašnjaka je vidljiv na slici 16.



Slika 16. Presjek sklopa motora i zamašnjaka

Nakon što je određen sklop motora i zamašnjaka, potrebno je konstruirati kolijevku na koju se taj sklop prihvaća. Kolijevka se, osim što nosi sklop motora i zamašnjaka, mora moći zakretati oko horizontalne osi okomite na uzdužnu os broda i to na visini težišta zamašnjaka.

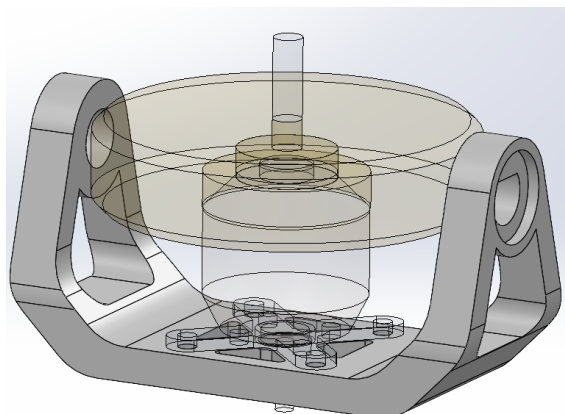
Prvi korak je konstruiranje oblika koji ima dovoljnu veličinu baze za prihvaćanje motora i obuhvaća zamašnjak. Taj model je vidljiv na slici 17.



Slika 17. Početni model kolijevke

Nakon toga se dodaju provrti za osovine oko kojih se kolijevka zakreće. Važno je napomenuti da os tih provrta mora prolaziti kroz težište zamašnjaka. Kako se moment motora za zakretanje preko osovinice mora prenositi na kolijevku, odlučeno je da će se prijenos momenta na osovinice na strani remenice izvesti oblikom provrta i osovinice u obliku slova „D“. Posljednja stvar koju je potrebno dodati da bi model bio funkcionalan su provrti za montažu motora.

U ovom trenutku se vidi kako model kolijevke ima puno nepotrebnog materijala te iz tog razloga skupa sa činjenicom da je to jedna od najistaknutijih pozicija, odlučeno je da će se izrađivati postupkom 3D printanja. Zadnji korak je uklanjanje viška materijala i stvaranje estetski „ugodnog“ modela vidljivog na slici 18.



Slika 18. Konačni model kolijevke

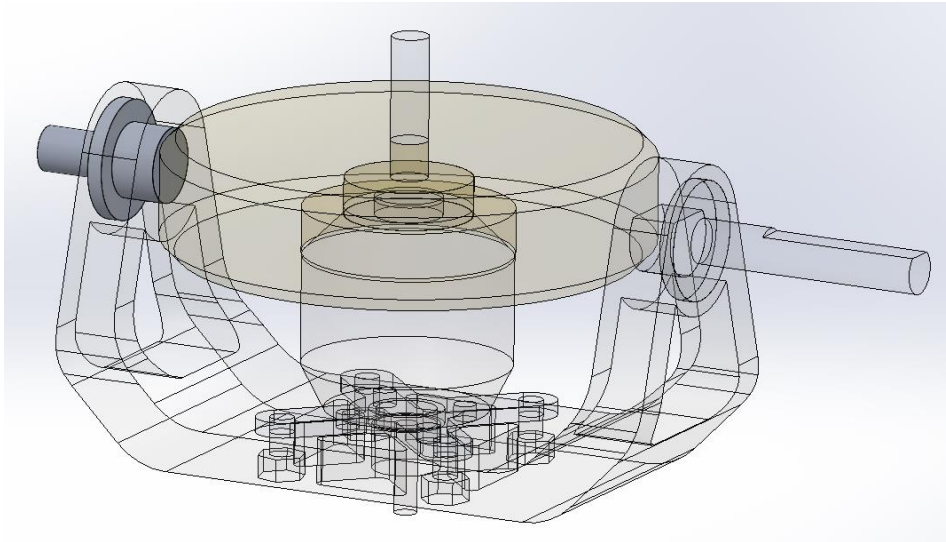
4.1.1. Odabir ležajeva i konstruiranje osovinica

Prije nego što se započelo sa konstruiranjem vertikalnih nosača, bilo je potrebno odrediti koji ležajevi će se koristiti za mogućnost zakreta osovinica u nosačima. Kriteriji za ležaj su mali otpor vrtnje, najmanja moguća debljina stijenke ležaja i unutarnji promjer u rasponu od 5-8 mm. Odabrani ležaj vidljiv na slici 19. je SKF HK 0608. To je igličasti ležaj s jako niskim otporom vrtnje u usporedbi s kliznim ležajevima, a ima izrazito nisku debljinu stijenke. Pronađena veličina ima unutarnji promjer od 6 mm, vanjski promjer od svega 10 mm te širinu od 8 mm.

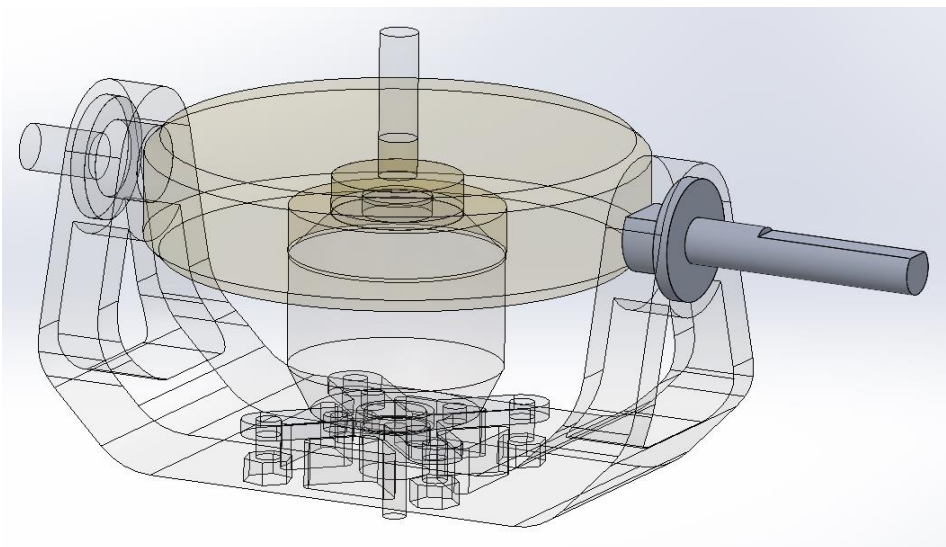


Slika 19. Ležaj SKF HK 0608 [12]

Nakon što je ležaj odabran, bilo je moguće konstruirati i osovinice koje povezuju kolijevku s nosačima. Lijeva osovina vidljiva na slici 20. je jako jednostavna jer ona samo povezuje kolijevku s nosačem, a desna (Slika 21.) je malo kompliciranija budući da osim povezivanja kolijevke s nosačem, mora prenositi i moment s remenice na kolijevku što se osigurava prijenosom s pomoću oblika. Materijal za osovinice je aluminij zbog čvrstoće i mogućnosti dobre završne obrade koja je bitna za ležaj.



Slika 20. Prikaz lijeve osovinice u sklopu

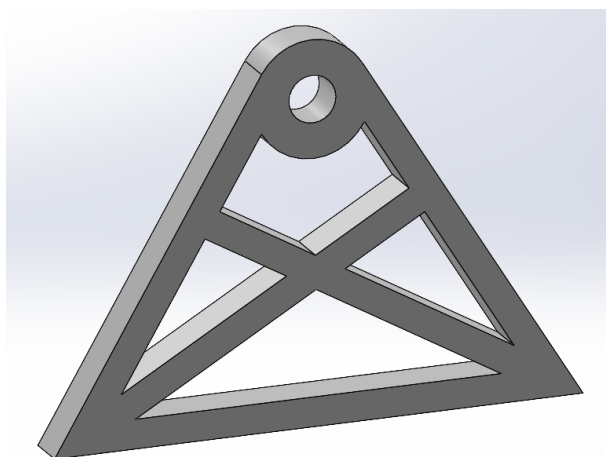


Slika 21. Prikaz desne osovinice u sklopu

4.2. Konstruiranje vertikalnih nosača i postolja

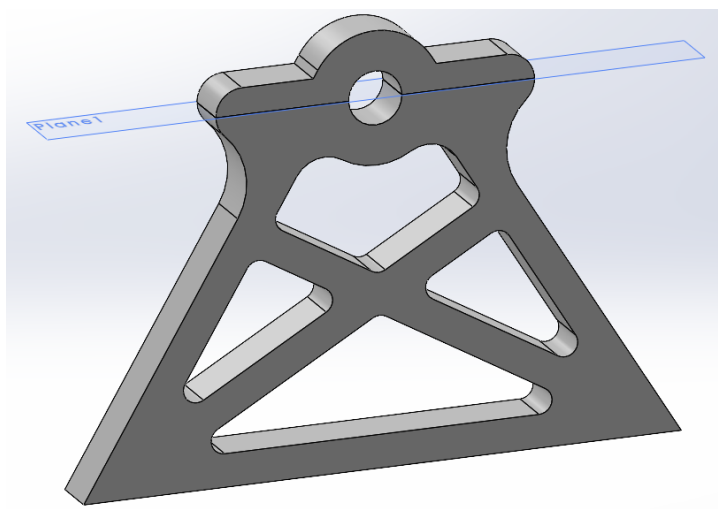
Funkcija vertikalnih nosača je povezivanje kolijevke s postoljem, tj. držanje ležajeva na dovoljnoj visini kako bi se kolijevka mogla neometano zakretati. Unaprijed je određeno da će se nosači izrađivati postupkom 3D printanja kako bi se jednostavno napravili složeni oblici iz razloga da se može gledati kroz nosače da ne zaklanjaju pogled na sami giroskop.

Prvi korak je stvaranje jednostavnog oblika prikazanog na slici 22. koji drži ležajeve na dovoljnoj visini. Debljina nosača je određena širinom ležaja.



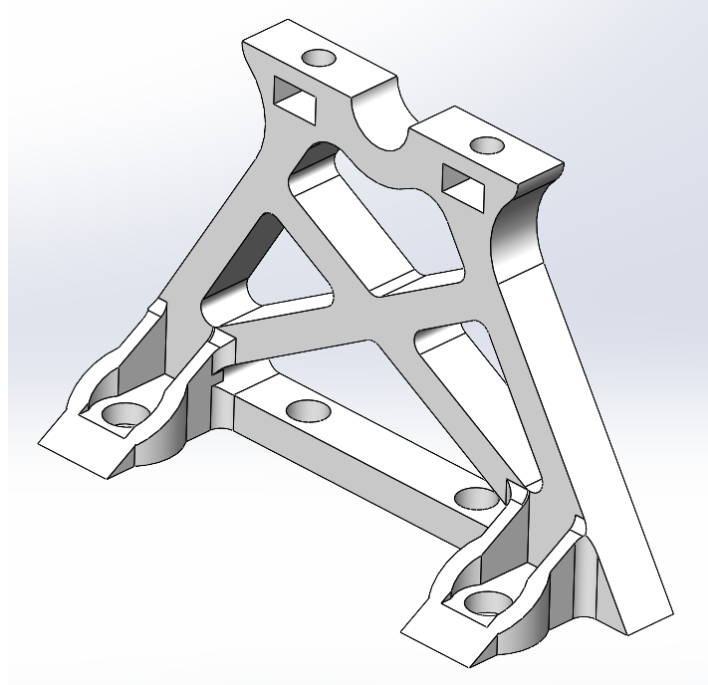
Slika 22. Početni oblik vertikalnih nosača

Sljedeći korak je prilagodba gornjeg dijela nosača gdje se montira ležaj kako bi se omogućilo vađenje ležajeva bez uklanjanja nosača s postolja. To je izvedeno tako da je nosač rasječen kroz centar ležaja i tako se dobije poklopac nosača i donji dio nosača. Uz to su dodane i površine kroz koje se poklopac vijcima spaja na donji dio nosača (Slika 23.).

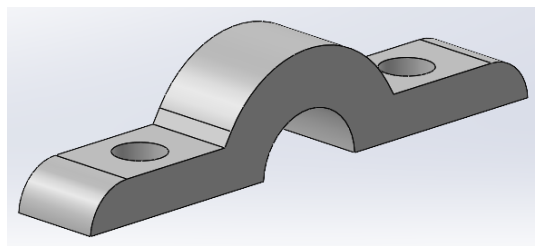


Slika 23. Prikaz ravnine sječenja vertikalnog nosača

Posljednji korak kod konstruiranja vertikalnih nosača je dodavanje ukruta i provrta za montiranje na postolje. Na slikama 24. i 25. su prikazani vertikalni nosač i njegov poklopac.



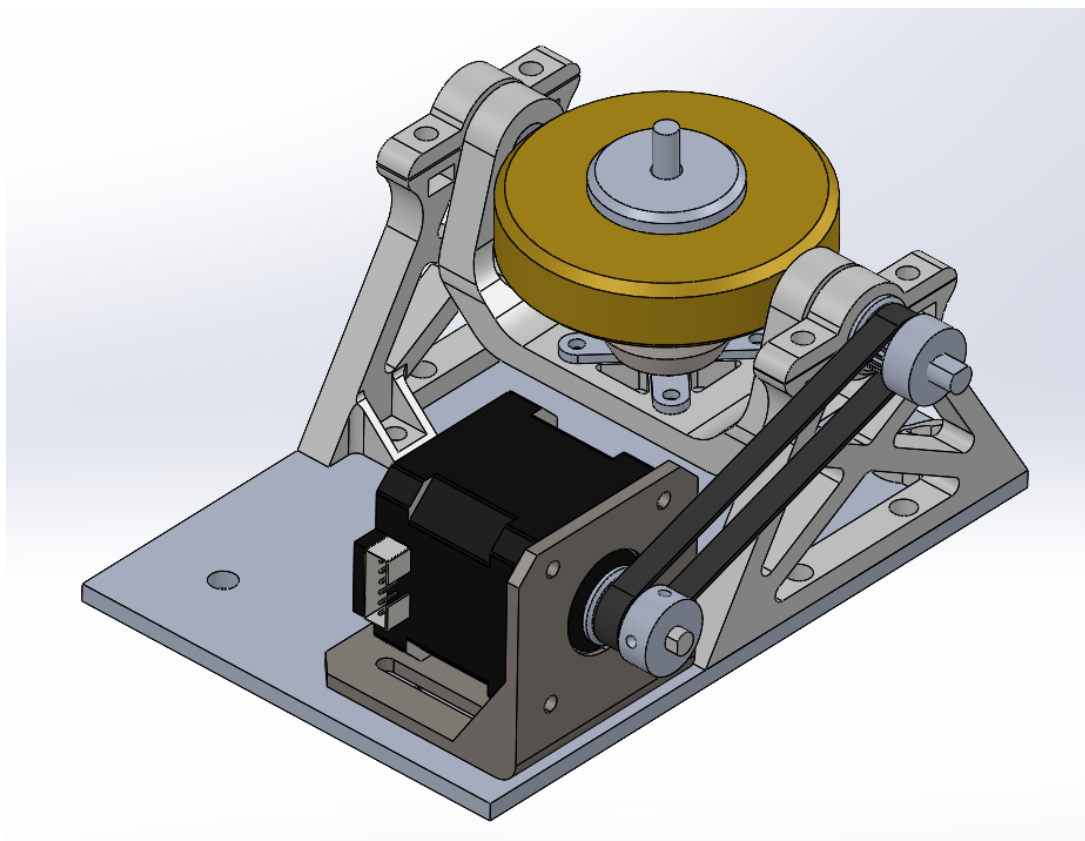
Slika 24. Desni vertikalni nosač



Slika 25. Poklopac vertikalnog nosača

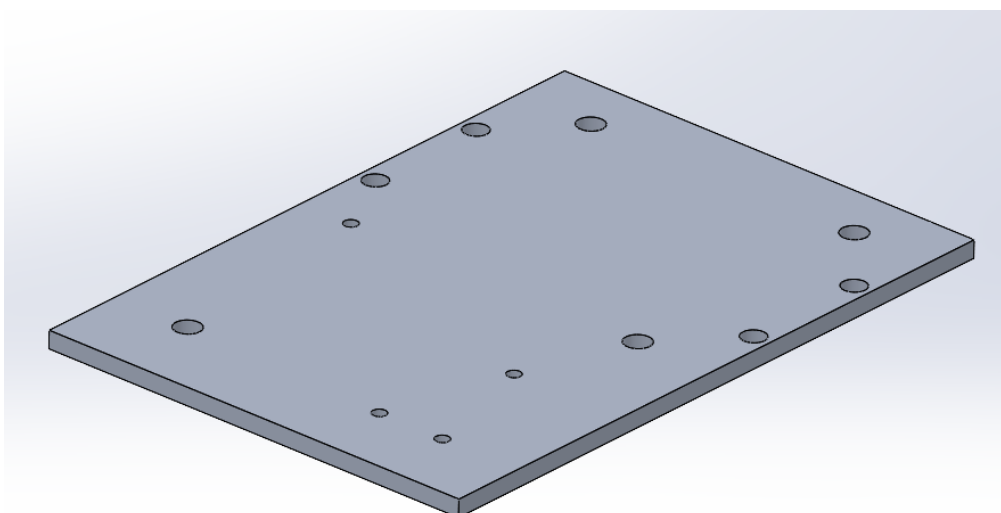
Još je ostalo konstruirati postolje koje povezuje sve dijelove u cjelinu. Odlučeno je da će se postolje izrađivati iz aluminijske ploče debljine 4 mm zbog toga što takva ploča neće imati veliku masu, bit će dovoljno kruta da podnese sve sile u radu stabilizatora i dovoljno debela da se u nju mogu narezati navoji.

Slika 26. prikazuje raspored svih dijelova na postolju.



Slika 26. Raspored svih dijelova stabilizatora na postolju

Slika 27. prikazuje izgled samog postolja.



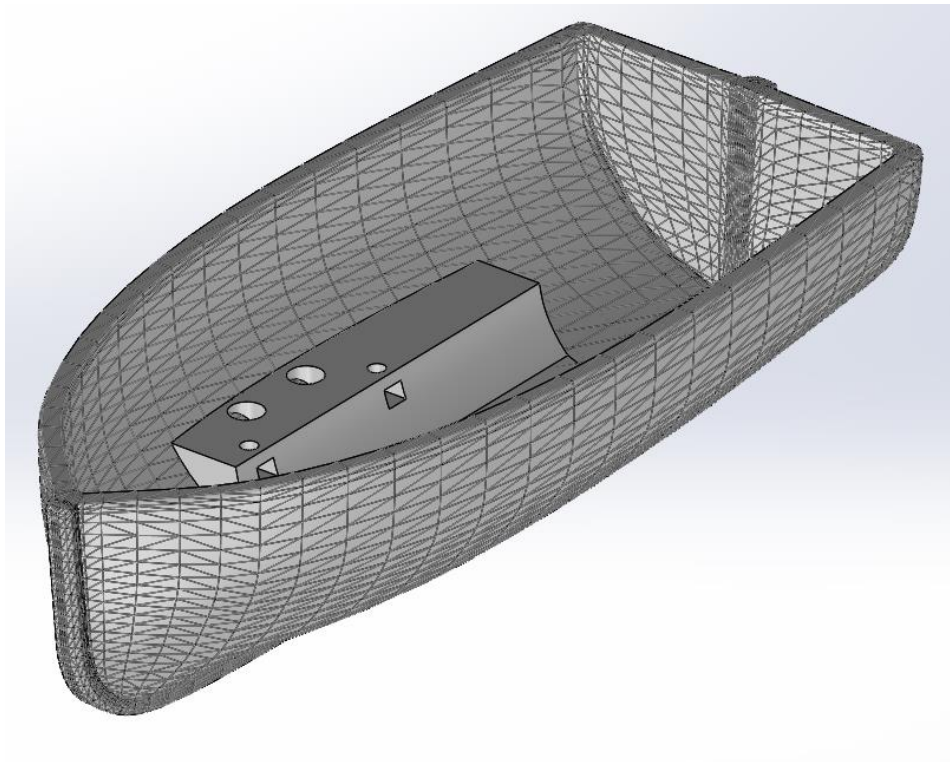
Slika 27. Postolje

4.3. Maketa brodice

Da bi maketa ovog rada bilo vjerna, potrebno je napraviti i model broda s pomoću kojega će se testirati funkcionalnost sustava.

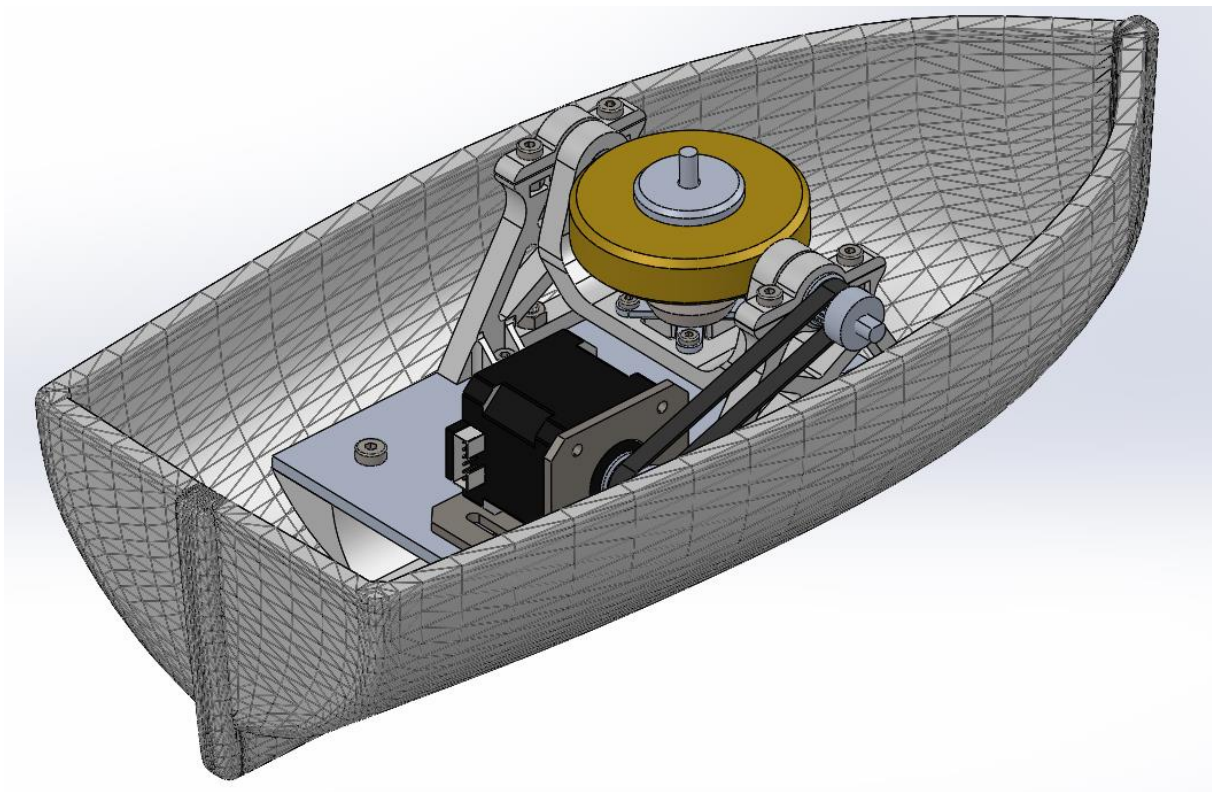
Odmah na početku je određeno da će se brodica izraditi metodom 3D printanja. Sami model brodice je preuzet s interneta, a potom ga je trebalo skalirati na veličinu da model giroskopskog stabilizatora može stati u njega, a da još uvijek nije prevelik za izradu. Nakon skaliranja je još bilo potrebno konstruirati prijvate za postolje kako bi se vijcima sve moglo spojiti u cjelinu.

Model brodice je prikazan na slici 28.



Slika 28. Model brodice

Na Slici 29. se može vidjeti kako izgleda cijeli model giroskopskog stabilizatora u brodu.



Slika 29. Model giroskopskog stabilizatora unutar modela broda

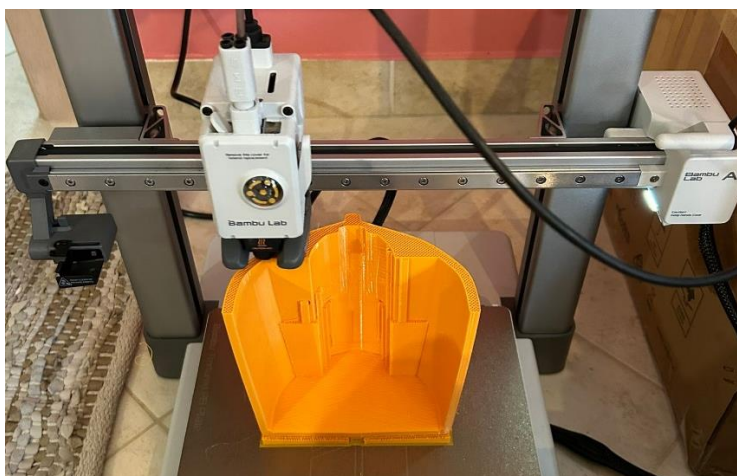
5. IZRADA I SASTAVLJANJE MODELA

Nakon što je gotovo konstruiranje u programskom alatu i nakon što je napravljena tehnička dokumentacija, vrijeme je da se krene u proizvodnju.

Najprije su se grupirali svi dijelovi koji se izrađuju metodom 3D printanja, te se odredilo koji dijelovi će se printati FDM metodom, a koji SLA metodom. FDM, ili taložno modeliranje taljenjem, funkcionira tako da koristi plastični filament koji se zagrijava do točke taljenja i zatim nanosi sloj po sloj na platformu za printanje. Svaki sloj se stvrdnjava prije nego što printer nanese sljedeći. Ova tehnologija je popularna zbog svoje pristupačnosti i širokog izbora materijala, te je idealna za izradu prototipova, funkcionalnih dijelova i manjih serija proizvoda. Međutim, kvaliteta može varirati ovisno o postavkama printera, a površine često nisu glatke i zahtijevaju dodatnu obradu. S druge strane, SLA, ili stereolitografija, koristi tekući fotoosjetljivu smolu koja se stvrdnjava uz pomoć UV svjetla. Proces funkcionira tako što se korištenjem UV zraka stvrdnjava sloj smole, i tako sloj po sloj gradi objekt. SLA omogućava izradu objekata izuzetno visoke preciznosti i glatkih površina, zbog čega se koristi kod precizne izrade prototipova.

Zbog navedenih karakteristika, SLA metodom printanja su izrađeni svi dijelovi giroskopskog stabilizatora a to su: vertikalni nosači, poklopci nosača i kolijevka. FDM metodom se izradio model broda zbog same veličine modela, ali i zbog činjenice da za brod nije potrebna velika preciznost i kvaliteta površine te što za FDM metodu možemo smanjiti postotak ispuhe modela tako da nam brod ima manju masu i da se manje materijala potroši na izradu.

Na slici 30. se može vidjeti postupak 3D printanja modela broda.



Slika 30. 3D printanje FDM metodom

Nakon što su dijelovi isprintani, neke od njih je bilo potrebno dodatno prilagođavati. Brod je printan iz 2 dijela zbog njegove veličine, pa ga je nakon printanja trebalo zalijepiti u cjelinu. Nakon spajanja, model se pobrusio izvana te je premazan epoksidnom smolom u 2 sloja kako bi bili sigurni da neće propustiti vodu prilikom rada. Vertikalni nosači su također naknadno obrađivani. Da bi se osiguralo da punom površinom stoje na postolju te da su savršeno uspravni, baze nosača su poravnate na glodalici što se može vidjeti na slici 31.



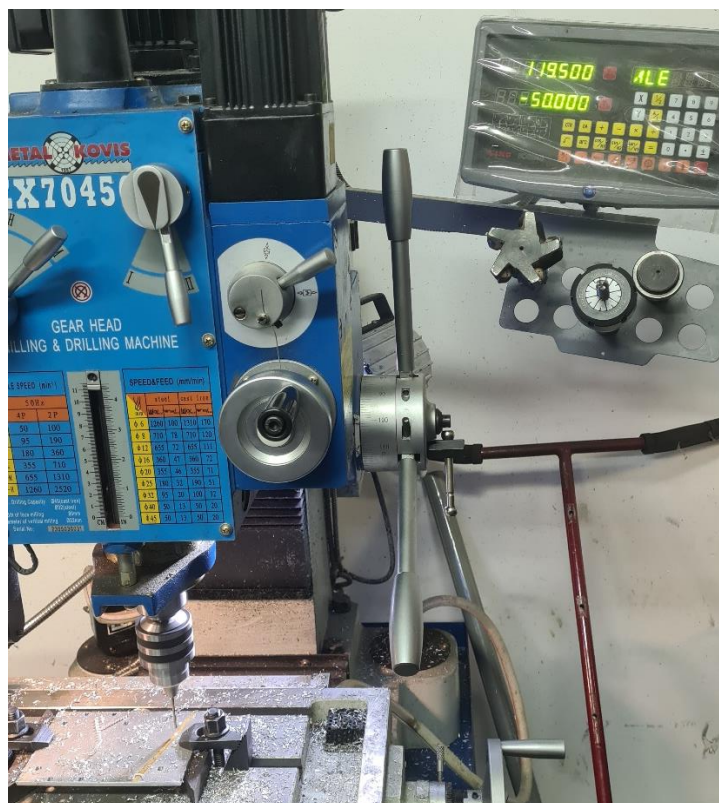
Slika 31. Poravnjavanje baza nosača

Postolje je također obrađivano na glodalici. Nakon što je izrezan aluminijski sirovac iz ploče, prvo su se na glodalici poravnale stranice i skratile na potrebne dimenzije. Ovaj postupak je vidljiv na slici 32.



Slika 32. Poravnjavanje stranica postolja

Nakon toga je još bilo potrebno probušiti rupe pomoću koordinatnog stola na glodalici i narezati navoje (slika 33.)



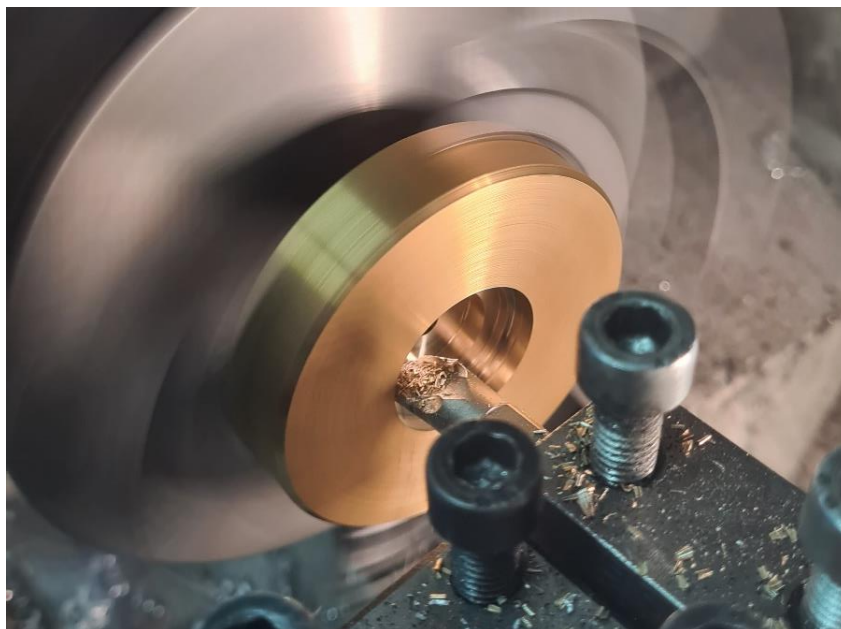
Slika 33. Bušenje rupa pomoću koordinatnog stola glodalice

Osovinice su izrađene tokarenjem prema tehničkoj dokumentaciji. Lijeva osovinica nije zahtijevala dodatnu obradu, dok je desnu bilo potrebno i glodati kako bi se napravile ravne površine za prijenos momenta oblikom. Primjer desne osovinice nakon tokarenja je prikazan na slici 34.



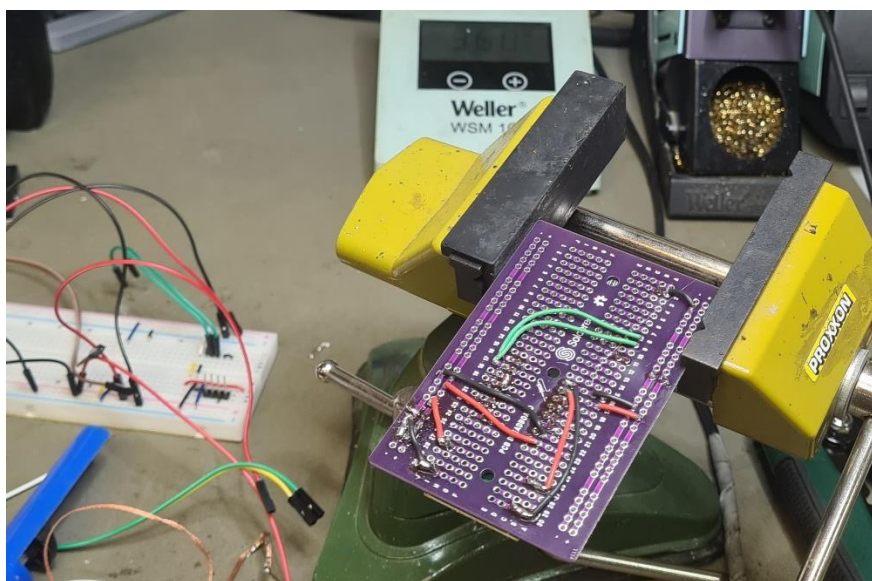
Slika 34. Desna osovinica na tokarskom stroju

Zamašnjak je također izrađen tokarenjem. Nakon što je sirovac odrezan s pomoću tračne pile, na tokarilici su se poravnale stranice i dovele na željene dimenzije. Nakon toga je bilo potrebno izdubiti provrte za centriranje i prihvat na motor. Proces dubljenja provrta se može vidjeti na slici 35.

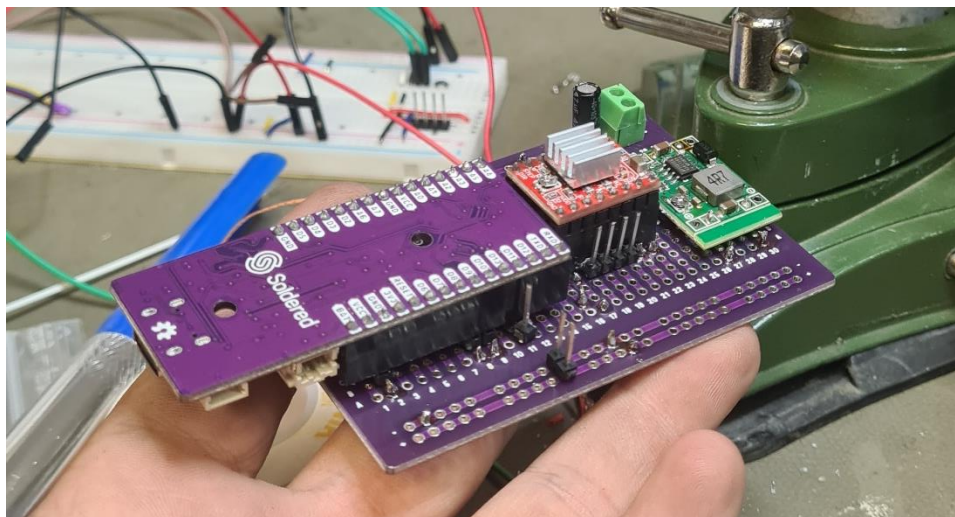


Slika 35. Tokarenje zamašnjaka

Elektroničke komponente su povezane u cjelinu lemljenjem na pločicu za prototipiranje te se tako osiguralo da su spojevi kvalitetni i da se ne događa gubljenje kontakata u radu. Proces lemljenja pločice se može vidjeti na slici 36., a gotova pločica na slici 37.



Slika 36. Proces proizvodnje pločice



Slika 37. Proizvedena i sastavljena pločica

Na kraju je uslijedilo sastavljanje modela kojeg možete vidjeti na slici 38.



Slika 38. Sastavljeni model giroskopskog stabilizatora u maketi broda

6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I USPOREDBA SA SIMULACIJOM

Usporedba simulacija s izmjerenim vrijednostima ključna je za svaki projekt, jer omogućuje validaciju predviđanja koja su napravljena u fazi planiranja i dizajna. Simulacije koriste matematičke modele i algoritme za predviđanje ponašanja sustava pod različitim uvjetima, no ove predikcije trebaju biti potvrđene stvarnim podacima kako bi se osigurala njihova točnost i pouzdanost. Usporedba rezultata simulacija sa stvarnim mjerenjima pomaže u identifikaciji bilo kakvih odstupanja, omogućava prilagodbu modela i optimizaciju dizajna, te poboljšava ukupnu kvalitetu i izvedbu projekta.

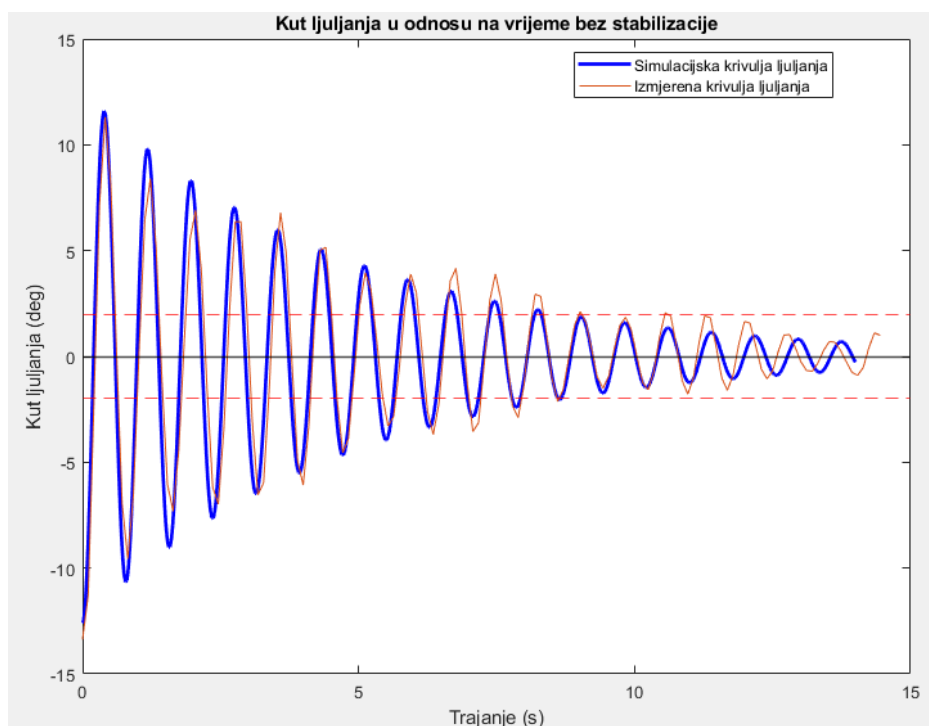
Kako je rečeno u uvodu, cilj ovoga rada je razviti giroskopski sustav stabilizacije da se amplituda kuta ljuljanja pri vanjskoj pobudi smanji za barem 50 % te da se broj oscilacija ljuljanja broda od puštanja s određenog nagiba do amplitude ljuljanja od 2 stupnja također smanji za 50 %.

Budući da je nezgodno u stvarnom svijetu replicirati vanjsku pobudu kao na simulaciji, a i zbog činjenice da je prvi zahtjev dosta povezan s drugim zahtjevom, simulacije i validacije će se raditi samo za drugi zahtjev i to na jednostavan način, a to je da se brod nagne na određeni kut ljuljanja te prepusti samom sebi do smirivanja.

Tijekom testiranja modela ustanovljeno je da je maketa brodice premala za ovaj model stabilizatora pa ne može izdržati njegovu težinu jer bi potonuo. Iz tog razloga je moguće validirati samo simulacije ljuljanja broda bez stabilizacije i s giroskopskom stabilizacijom bez aktivnog upravljanja budući da maketa pluta ako se makne koračni motor za kontroliranje precesijskog pokreta.

Testiranja su rađena u posudi s vodom a podaci su bilježeni u stvarnom vremenu. Skupljanje podataka u stvarnom vremenu ostvareno je s pomoću „Data Streamer“ funkcije u programu Excel koja očitava signale koji kabelom ulaze kroz određeni konektor u laptopu i zapisuje ih u tablicu. Za obradu podataka se koristio Matlab radi mogućnosti prikaza izmjerenih i simuliranih podataka na istom grafu.

Prvo testiranje je bilo snimanje smirivanja ljuľjanja broda bez ikakvog sustava stabilizacije, kao što je prikazano u simulaciji na slici 5. Izmjereni podaci zajedno sa simuliranim podacima su prikazani na slici 39.

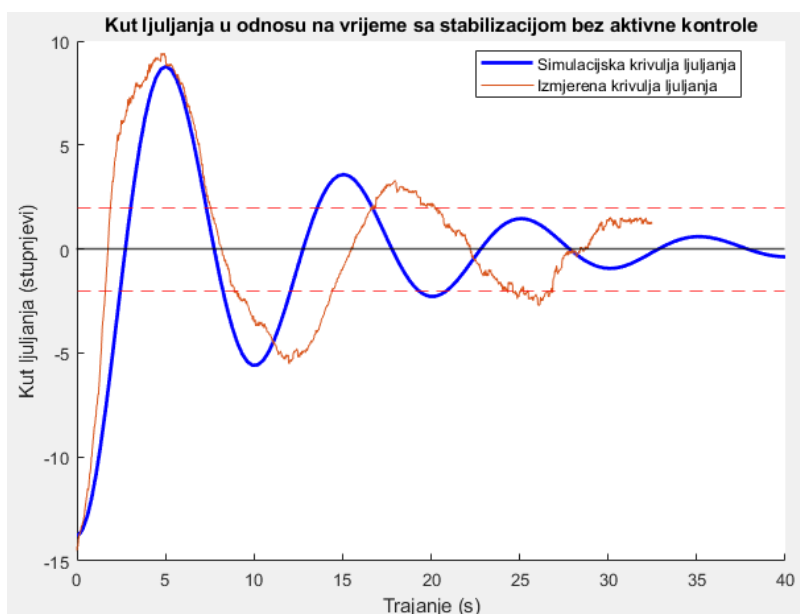


Slika 39. Prikaz izmjerenih i simulacijskih odziva kuta ljuľjanja u odnosu na vrijeme bez stabilizacije

Može se primijetiti da jednađžba (12) jako dobro opisuje ponašanje makete te da je poklapanje rezultata izvrsno.

Vrijednosti kuta ljuľjanja manji od 2 stupnja se nekad mogu čudno ponašati zbog šuma u senzoru pa se zbog toga sve promatra do tog kuta, a dodatno pomaže što nagibi ljuľjanja manji od 2 stupnja nisu problem u stvarnom svijetu i sustav stabilizacije primarno služi sa smanjenje većih nagiba.

Sljedeće testiranje je za validaciju simulacije ljuľanja broda s girokopskim stabilizatorom bez aktivne kontrole (slika 6.). Izmjereni podaci zajedno sa simuliranim podacima su prikazani na slici 40.



Slika 40. Prikaz izmjerenih i simulacijskih odziva kuta ljuľanja u odnosu na vrijeme sa stabilizacijom bez aktivne kontrole

Može se primijetiti da poklapanje rezultata nije savršeno, ali je i dalje jako dobro budući da je broj oscilacija točan, a upravo taj podatak nam treba za provjeravanje ispunjavanja ciljeva rada. Broj oscilacija ljuľanja broda od puštanja s nagiba od 13 stupnjeva do amplitude ljuľanja manje od 2 stupnja je jednak i na simuliranoj i na izmjerenoj krivulji. Kod sustava bez stabilizacije taj broj iznosi 11, a kod sustava sa stabilizacijom bez aktivne kontrole broj oscilacija je svega 2. To znači da je girokopski sustav za stabilizaciju bez aktivnog upravljanja napravio smanjenje broja oscilacija za oko 82 %, što je višestruko bolje nego što je bio cilj samog rada. S aktivnom kontrolom se sustav još bolje ponaša međutim radi prevelike mase se to ne može validirati na ovaj način.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio razviti učinkovit sustav stabilizacije plovila, koji koristi giroskopski uređaj za smanjenje nagiba broda uzrokovano valovima ili bočnim silama. U radu je prikazan postupak projektiranja, simuliranja, izrade, montaže, programiranja i testiranja modela cjelokupnog sustava. Ovaj projekt predstavlja složen inženjerski izazov koji zahtijeva interdisciplinarni pristup i integraciju znanja iz različitih područja. Uspješna realizacija uključuje ne samo duboko razumijevanje temeljnih inženjerskih principa, već i primjenu stručnosti iz domena poput znanosti materijala, mehanike, računalnog modeliranja i simulacija, te naprednih tehnoloških procesa. Za realizaciju ovakvog projekta bila su neophodna sva znanja i vještine stečene tijekom studija, koja su osigurala čvrst temelj u ključnim inženjerskim disciplinama. Ipak, kako svaki projekt ove razine složenosti zahtijeva kontinuirano učenje i prilagodbu, tijekom rada bilo je nužno proširiti postojeća znanja. Kroz ovaj proces, razvijena je sposobnost brzog usvajanja novih informacija, kritičkog razmišljanja i rješavanja problema, što je uvelike doprinijelo uspješnom završetku projekta.

Sustav je uspješno simuliran, konstruiran i izrađen, te ne samo da učinkovito ispunjava svoju svrhu stabilizacije broda, već značajno nadmašuje zadane ciljeve.

Iako kompletna maketa s aktivnom kontrolom ne može plutati i testirati se u vodi, rad aktivne kontrole je dokazan pokusom na stolu te uspješno obavlja svoju svrhu. Bez obzira na to, model bez aktivne kontrole je testiran u vodi te već on nadmašuje zadane ciljeve tako da je svrha ovog rada u potpunosti ispunjena.

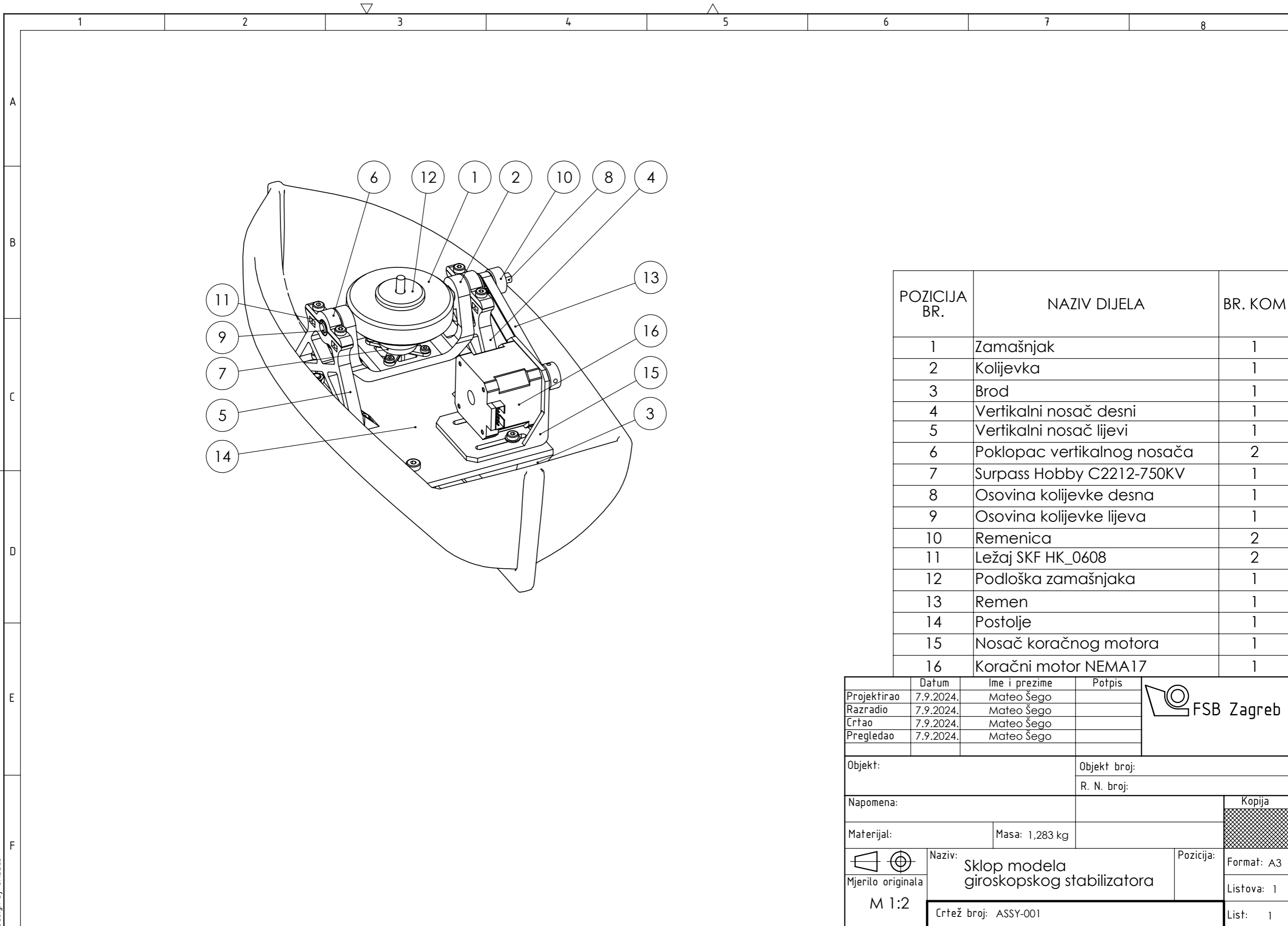
Bilo bi lijepo da se mogla proizvesti veća maketa broda kako bi mogla izdržati težinu stabilizatora i kako bi se sustav mogao testirati u cjelini, međutim jako sam zadovoljan postignutim te je ovaj projekt uvelike obogatio moje znanje i poboljšao način razmišljanja.

LITERATURA

- [1] Tehnički leksikon- Njihanje broda, dostupno na: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/njihanje-broda> , (pristupljeno: 11.9.2024.)
- [2] Anthony F. Molland: The Maritime Engineering Reference Book, Elsevier Linacre House, 2008.
- [3] Veemmarine: How Gyros Create Stabilizing Torque, 2014
- [4] Veemmarine: How Gyrostabilizers Work, 2014.
- [5] Muhammad Talha, Furqan Asghar, Sung Ho Kim: Design of Fuzzy Tuned PID Controller for Anti Rolling Gyro (ARG) Stabilizer in Ships, 2017.
- [6] Tipteh- koračni motori, dostupno na: <https://tipteh.com/hr/koracni-motori/> , (pristupljeno: 11.9.2024.)
- [7] Powerdrives- what is an esc, dostupno na: <https://powerdrives.net/blog/what-is-an-esc> (pristupljeno: 11.9.2024.)
- [8] Tristan Perez, Paul D. Steinmann: Analysis of Ship Roll Gyrostabiliser Control, 2009.

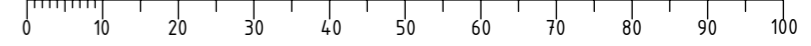
PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija

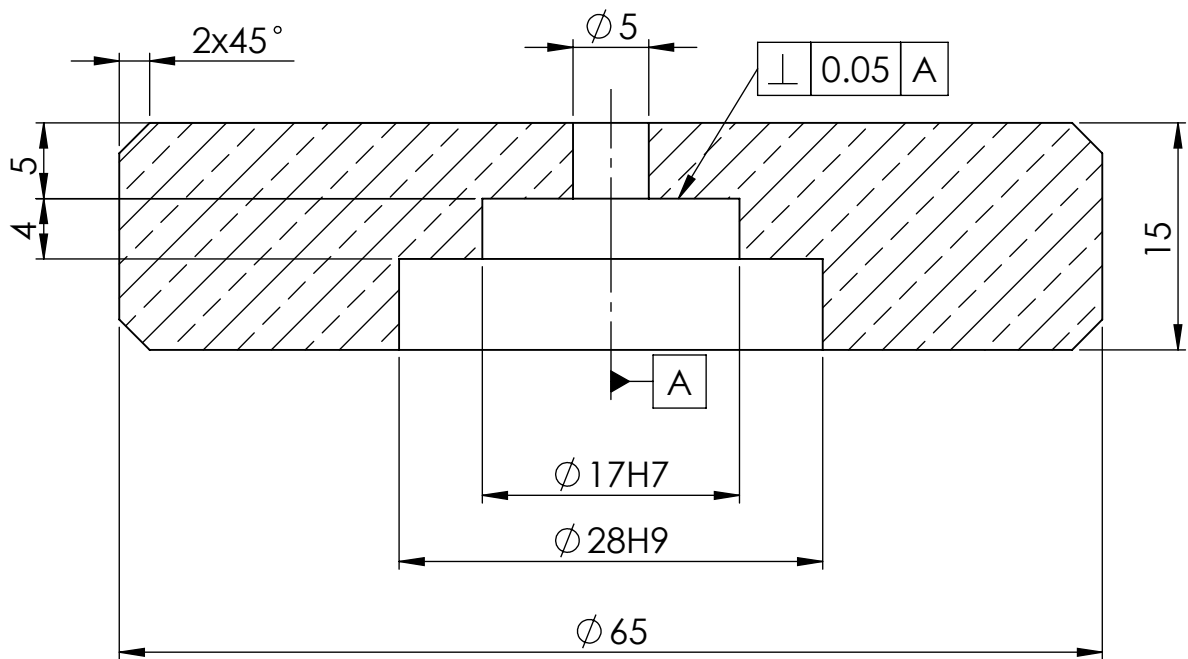


POZICIJA BR.	NAZIV DIJELA	BR. KOM
1	Zamašnjak	1
2	Kolijevka	1
3	Brod	1
4	Vertikalni nosač desni	1
5	Vertikalni nosač lijevi	1
6	Poklopac vertikalnog nosača	2
7	Surpass Hobby C2212-750KV	1
8	Osovina kolijevke desna	1
9	Osovina kolijevke lijeva	1
10	Remenica	2
11	Ležaj SKF HK_0608	2
12	Podloška zamašnjaka	1
13	Remen	1
14	Postolje	1
15	Nosač koračnog motora	1
16	Koračni motor NEMA17	1

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa: 1,283 kg		
 Mjerilo originala M 1:2	Naziv: Sklop modela giroskopskog stabilizatora		Pozicija:	Format: A3
				Listova: 1
Crtež broj: ASSY-001				List: 1



Design by CADLab



Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
$\phi 17H7$	+0,018 0			R. N. broj:		
$\phi 28H9$	+0,052 0	Napomena:				
		Materijal: Mjed	Masa: 0.375 kg			
		 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	
		M 2:1	Zamašnjak		1	
		Crtež broj: PART-001			Format: A4	
					Listova: 1	
					List: 1	

Design by CADL.ab

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

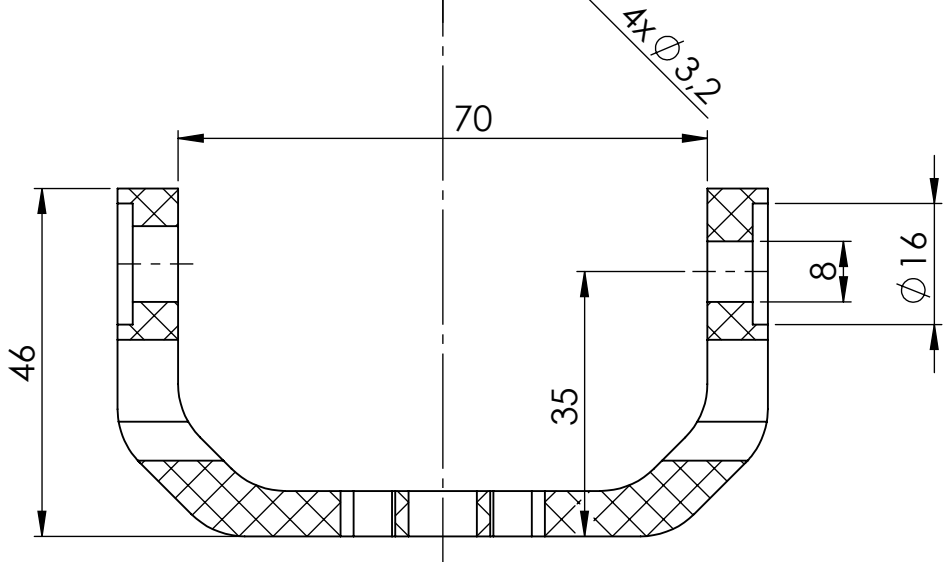
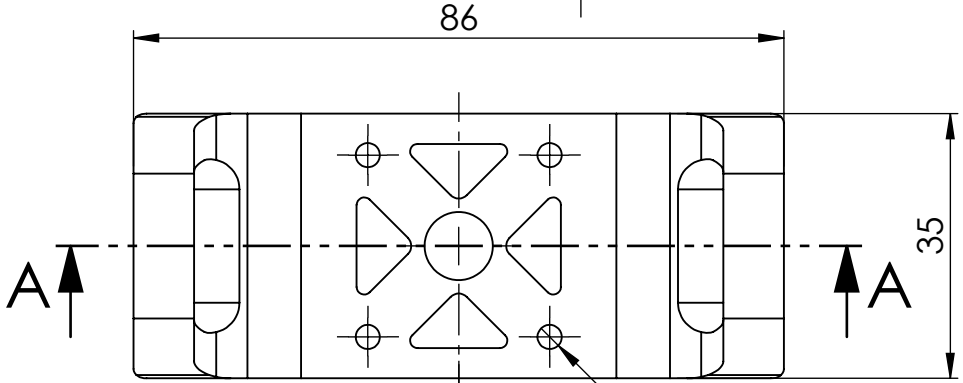
C

B

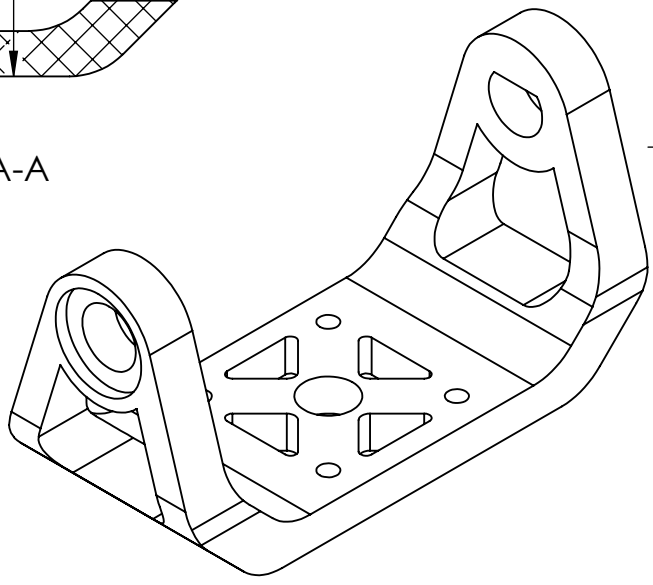
B

A

A



SECTION A-A



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena: Izraditi 3D printanjem na temelju STL datoteke				Kopija
	Materijal: Polimer	Masa: 0.023 kg			
Mjerilo originala		Naziv:			Pozicija:
		Kolijevka			2
		Crtež broj: PART-002			Format: A4
				Listova: 1	
				List: 1	

Design by CADLlab

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

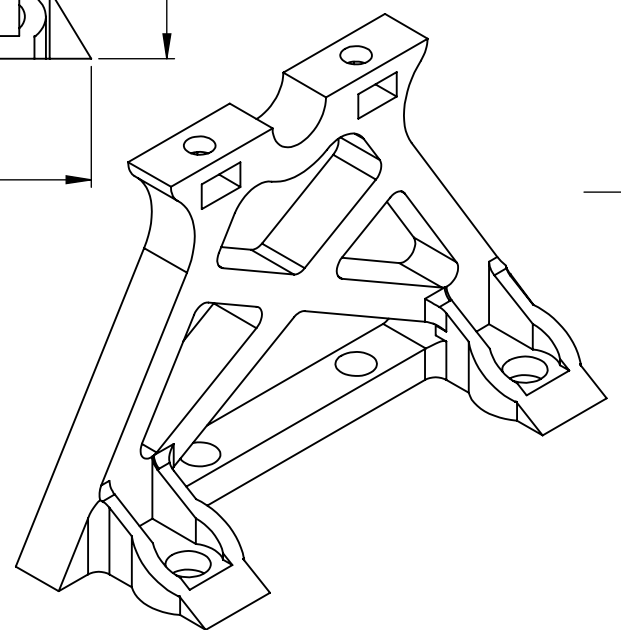
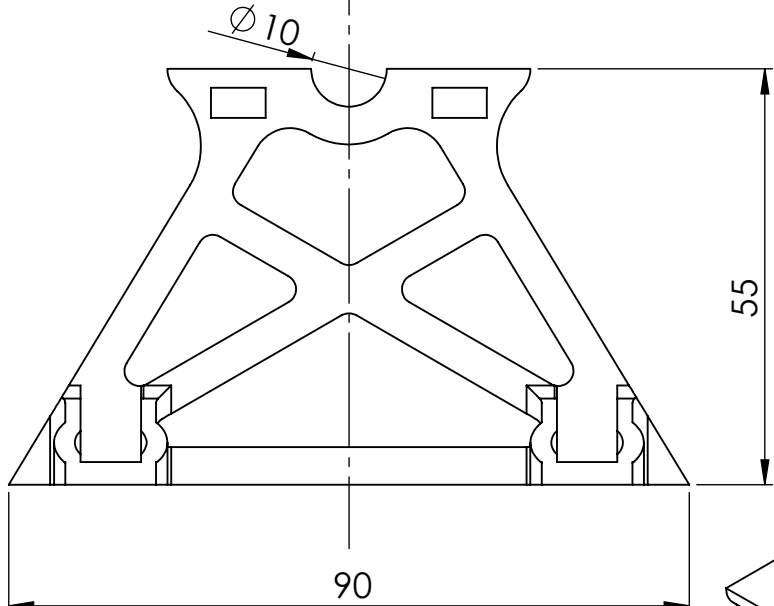
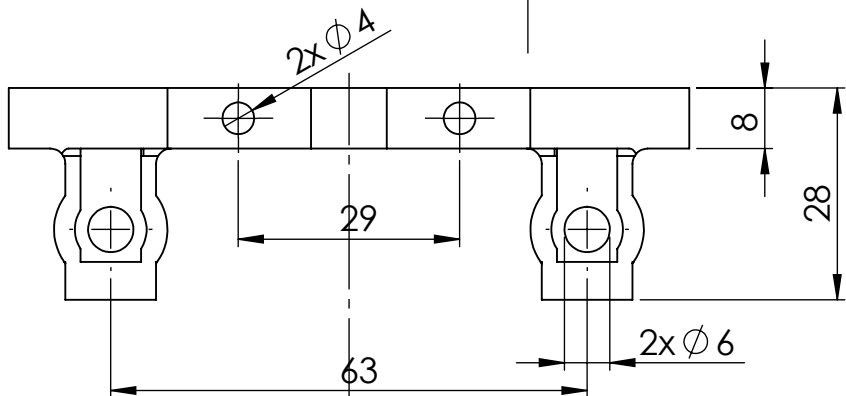
C

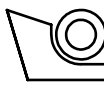
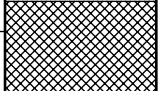
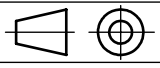
B

B

A

A



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
Napomena: Izraditi 3D printanjem na temelju STL datoteke					Kopija
Materijal: Polimer		Masa: 0.017 kg			
 Mjerilo originala M 1:1	Naziv: Vertikalni nosač desni			Pozicija: 4	Format: A4
	Crtež broj: PART-003				Listova: 1
					List: 1

Design by CADLlab

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

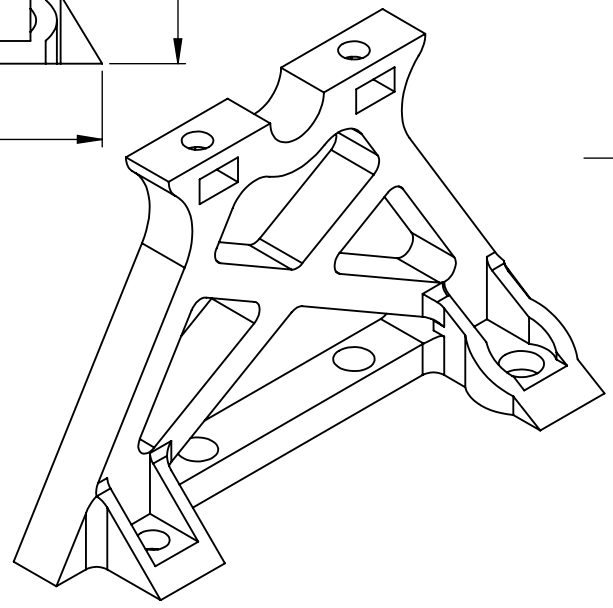
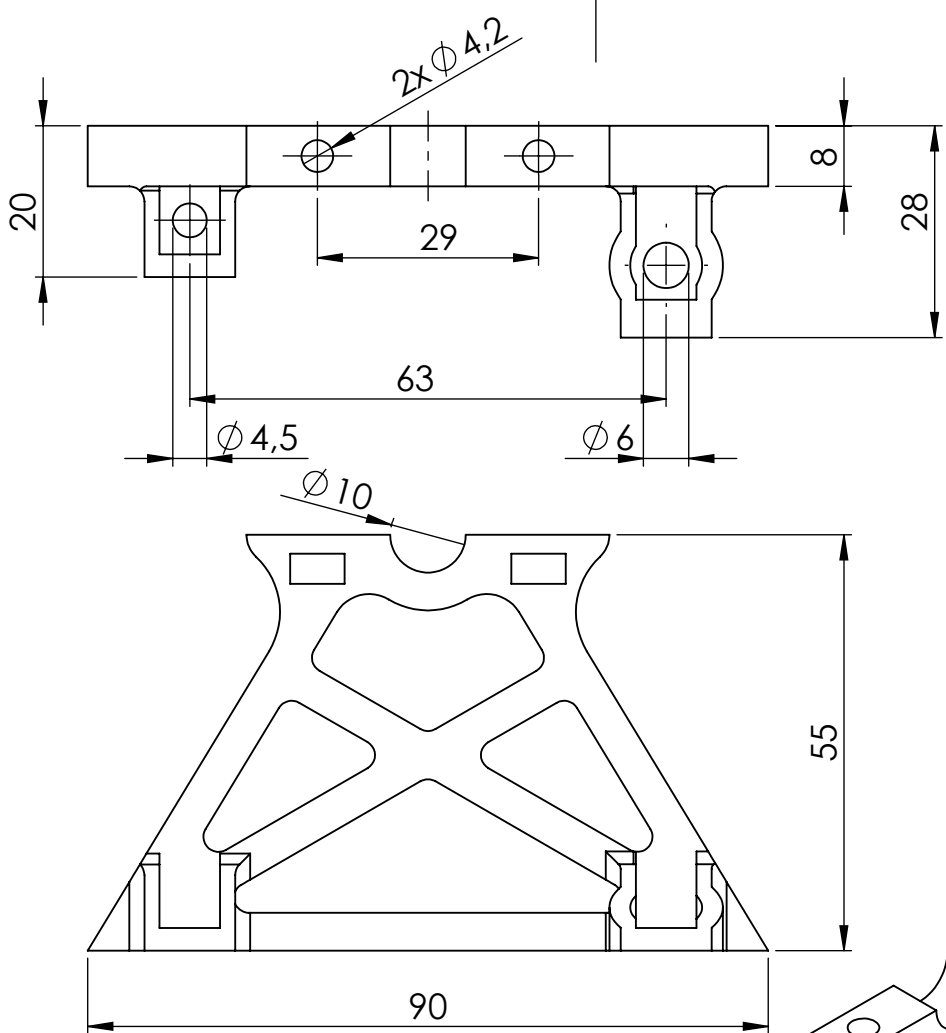
C

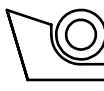
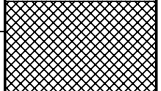
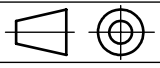
B

B

A

A

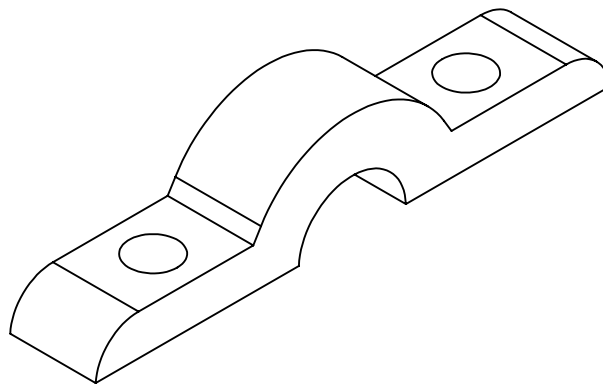
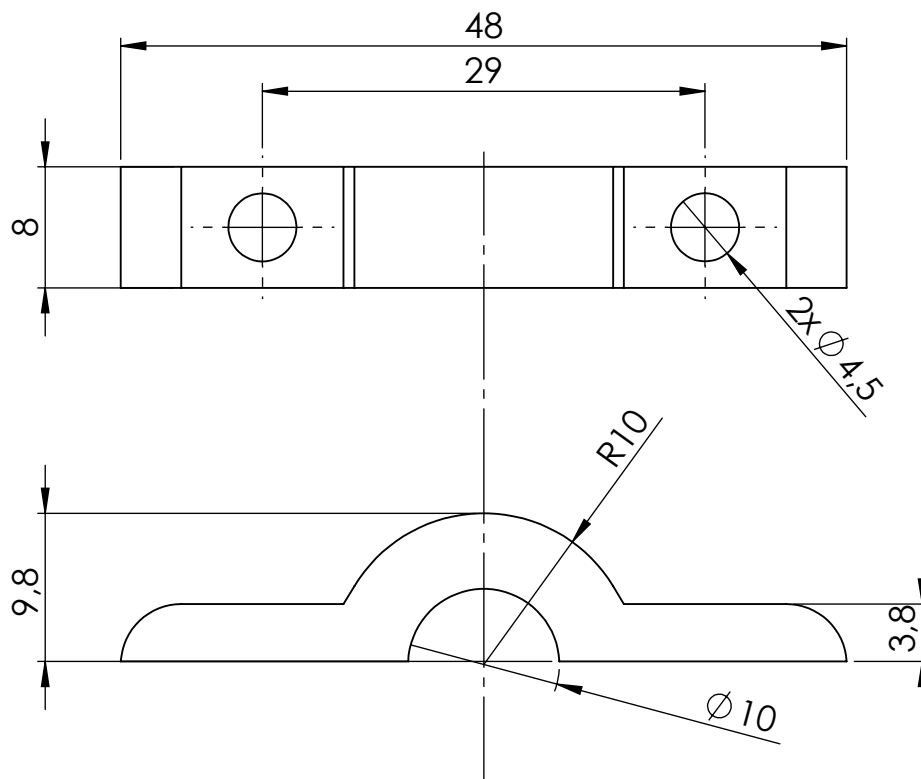


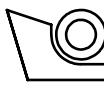
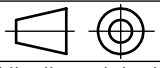
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena: Izraditi 3D printanjem na temelju STL datoteke				Kopija
	Materijal: Polimer	Masa: 0.016 kg			
	 Naziv:				
	Mjerilo originala	Vertikalni nosač lijevi			5
	M 1:1	Crtež broj: PART-004			Format: A4
					Listova: 1
					List: 1

Design by CADL.ab

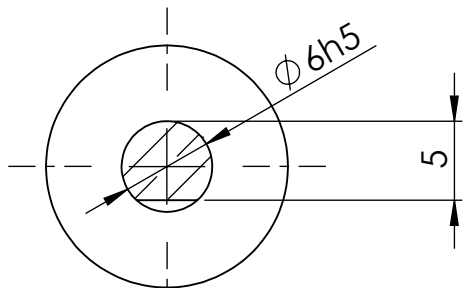
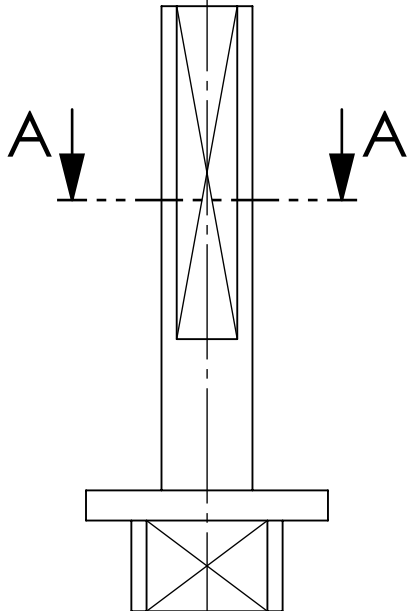
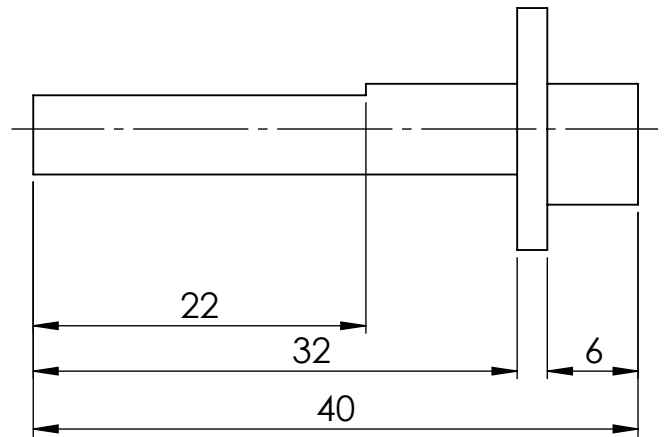
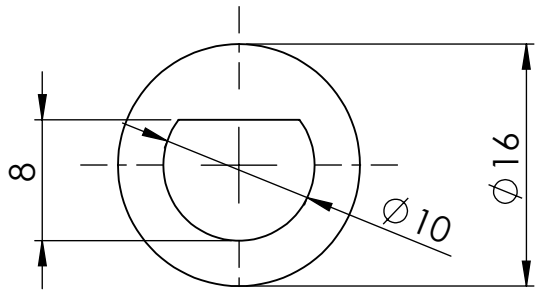
2

1

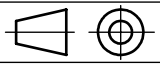


Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena: Izraditi 3D printanjem na temelju STL datoteke				Kopija
	Materijal: Polimer	Masa: 0.002 kg	Br. kom: 2		
	 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	
	M 2:1	Poklopac vertikalnog nosača		6	
		Crtež broj: PART-005		Format: A4	
				Listova: 1	
				List: 1	

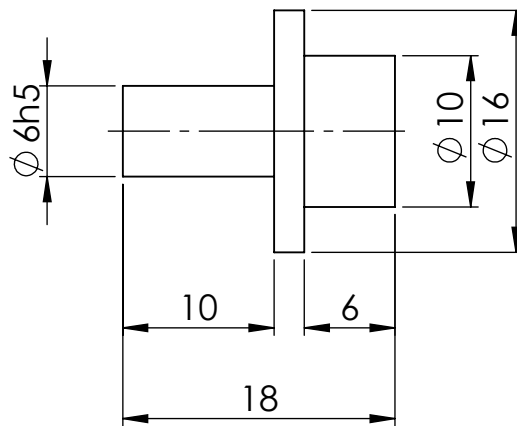
Design by CADL.ab


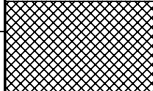
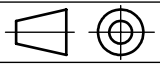


SECTION A-A

Broj naziva - code		Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
		Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
Ø6h5	0	Napomena:			R. N. broj:	
	-0,005					
		Materijal: Aluminij			Masa: 0.005 kg	<div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%; text-align: center; font-size: 8px;">Kopija</div>
		Naziv:			Pozicija:	
		 Mjerilo originala M 2:1			Osovina kolijevke desna 8	
		Crtež broj: PART-006				Format: A4
						Listova: 1
						List: 1

Design by CADL.ab



Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
		Projektirao	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
		Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
$\varnothing 6h5$	0 -0,005			R. N. broj:		
		Napomena:			Kopija	
		Materijal: Aluminij	Masa: 0.003 kg			
			Naziv:		Pozicija:	
		Mjerilo originala	Osovina kolijevke lijeva		9	
		M 2:1	Crtež broj: PART-007		Format: A4	
					Listova: 1	
					List: 1	

Design by CADLab

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

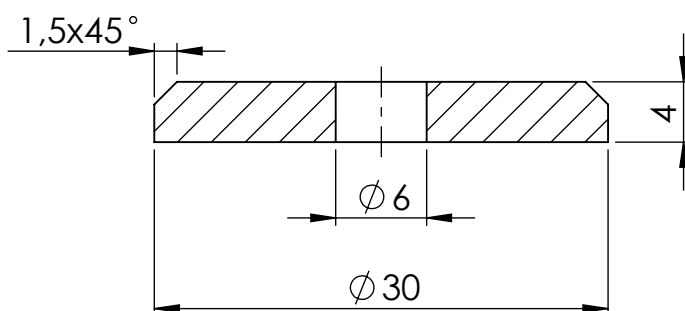
C

B

B

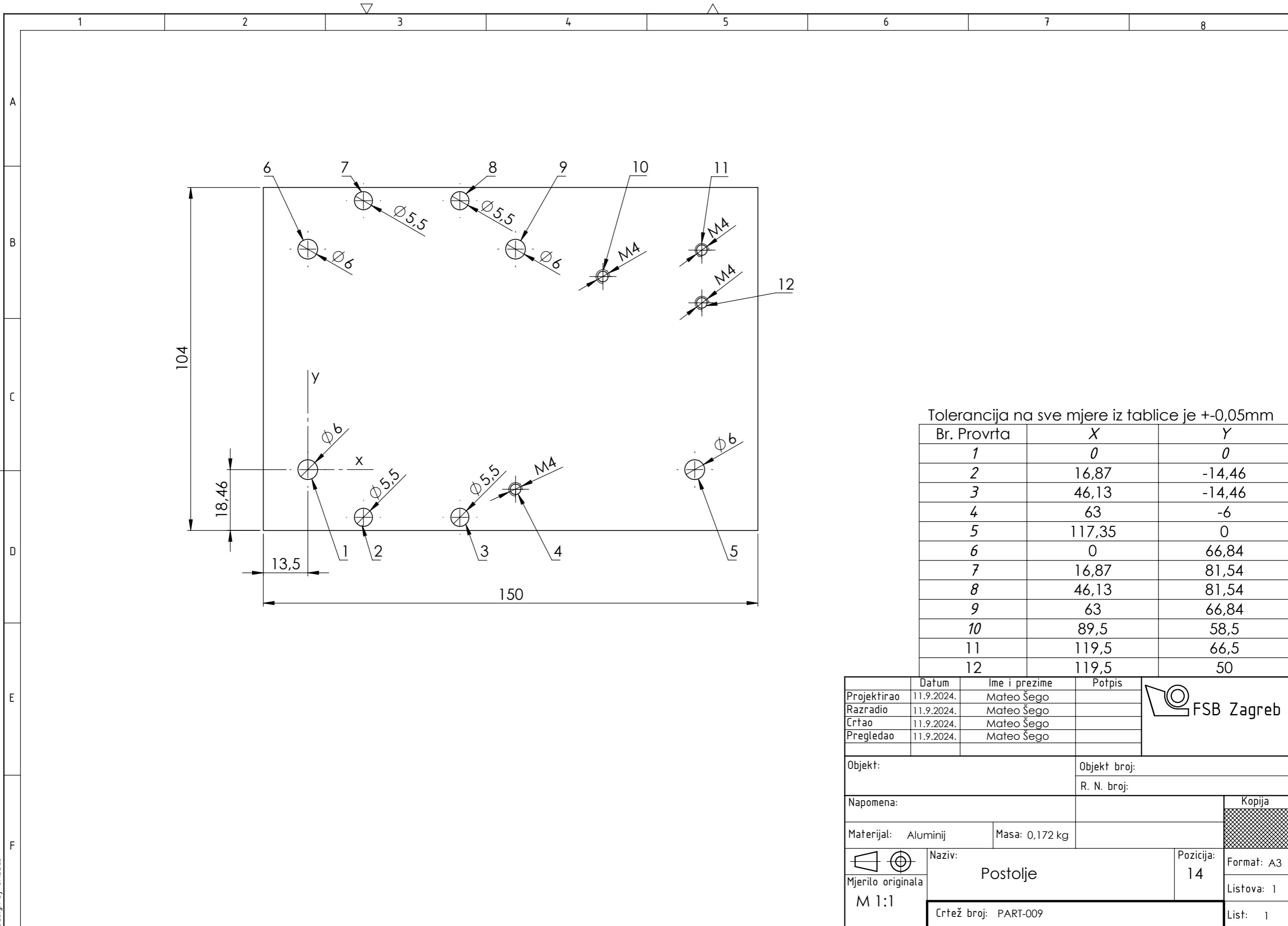
A

A



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Crtao	7.9.2024.	Mateo Šego		
	Pregledao	7.9.2024.	Mateo Šego		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
				R. N. broj:	
		Napomena:			Kopija
		Materijal: Aluminij	Masa: 0.007 kg		
		 Naziv:		Pozicija:	Format: A4
		Mjerilo originala		12	Listova: 1
		M 2:1		Crtež broj: PART-008	List: 1

Design by CADLab



Tolerancija na sve mjere iz tablice je $\pm 0,05\text{mm}$

Br. Provrta	X	Y
1	0	0
2	16,87	-14,46
3	46,13	-14,46
4	63	-6
5	117,35	0
6	0	66,84
7	16,87	81,54
8	46,13	81,54
9	63	66,84
10	89,5	58,5
11	119,5	66,5
12	119,5	50

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	11.9.2024.	Mateo Šego		
Razradio	11.9.2024.	Mateo Šego		
Crtao	11.9.2024.	Mateo Šego		
Pregledao	11.9.2024.	Mateo Šego		
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:	Aluminij	Masa:	0,172 kg	
	Naziv:		Pozicija:	
Mjerilo originala	Postolje		14	
M 1:1	Crtež broj: PART-009			Format: A3 Listova: 1 List: 1

Design by CADLab

