Regulacija kuta zakreta lista kormila broda

Jelenić, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:265203

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dino Jelenić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing. Dino Jelenić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu što je prihvatio moju ideju za izradu ovog završnog rada te mi bio potpora u svakom trenutku njegove izrade kao i za mnogobrojne korisne savjete. Hvala tvrtkama Festo i SMC na doniranoj opremi te Ribarskom obrtu Mišlov na financiranju ostale opreme.

Zahvaljujem se svojim roditeljima što su mi pružili priliku da studiram na ovom fakultetu i na bezuvjetnoj podršci u najtežim trenucima, također sam zahvalan i djedu što mi je dao na korištenje svoju radionu u kojoj sam izrađivao konstrukciju rada. Hvala i mojoj djevojci koja je bila uz mene i vjerovala u moj uspjeh kroz cijeli studij.

Dino Jelenić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DINO JELENIĆ** Mat. br.: 0035205085

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **REGULACIJA KUTA ZAKRETA LISTA KORMILA BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANGULAR POSITION CONTROL OF A SHIP RUDDER BLADE**

Opis zadatka:

U procesu edukacije studenata iz područja automatike, u cilju boljeg razumijevanja prilično apstraktne teorije automatske regulacije, potrebno je osobitu pozornost posvetiti laboratorijskim vježbama na realnim eksperimentalnim postavima. Automatska regulacija kao znanstvena disciplina nalazi široku primjenu i u području brodogradnje. Tipičan primjer koji se često navodi je upravljanje kutom zakreta lista kormila broda, čime se kod manevriranja proizvodi potreban moment okretanja broda oko njegovog težišta koje je pri sredini broda. Izrada nastavne makete krme broda koja bi sadržavala potrebne dijelove za kormilarenje brodom omogućila bi studentima jasan prikaz postupka održavanja smjera plovidbe i manevriranja brodom te načina rada autopilota, tj. automatskog kormilarskog uređaja broda.

U radu je potrebno:

- projektirati i izraditi drvenu nastavnu maketu krme broda koja sadrži glavne dijelove sustava za kormilarenje brodom (list kormila, osovinu kormila, ležajeve osovinskog voda i polugu kormila),
- izraditi maketu kormilarnice broda koja omogućuje unošenje željenog kuta kormila broda,
- opisati korištene komponente pri izradi edukacijske makete krme broda,
- razvijene upravljačke algoritme ispitati na nastavnoj maketi, te objasniti i dokumentirati dobivene rezultate.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
SAŽETAK III
SUMMARY IV
1. UVOD 1
1.1. Osnovne značajke hidrauličkog pogona 1
1.2. Osnovne značajke pneumatskog pogona 2
1.3. Inspiracija 2
1.4. Općenito o sustavu za kormilarnje brodom 3
1.5. Cilj završnog rada 5
2. IZRADA NASTAVNE MAKETE 6
2.1. Projektiranje i izrada konstrukcije krme broda 6
2.2. Izrada makete pulta za kormilarenje 12
2.3. Bojenje nastavne makete i postavljanje na nosač 13
3. ODABIR KOMPONENTI 15
3.1. Opis i karakteristike komponenti 15
3.1.1. Pneumatski cilindar 15
3.1.2. Elektropneumatski ventili 16
3.1.3. Senzori 20
3.1.4. Pretvarač napona 21
3.1.5. Relejni modul 22
3.1.6. Stabilizator napona 23
3.1.7. Priprema stlačenog zraka 24
3.2. Spajanje komponenti i postavljanje na nastavnu maketu 24
4. UPRAVLJANJE 26
4.1. Ostvarenje upravljanja sustava 26
4.2. Odabir mikrokontrolera 26
4.3. Implementacija P regulatora 27
4.4. Rezultati 31
5. ZAKLJUČAK 32
LITERATURA 33
PRILOZI 34

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni hidraulički krug [2] 1
Slika 2. Pneumatski sustav [4] 2
Slika 3. Kormilo stroj 4
Slika 4. Propeler i list kormila broda 5
Slika 5. Gradnja čeličnog trupa broda 6
Slika 6. Rebra postavljena na kobilicu broda 7
Slika 7. Postavljanje palube 8
Slika 8. Postavljanje oplate 9
Slika 9. Nanošenje akrilnog kita 9
Slika 10. Cilindar postavljen na svoje nosače 10
Slika 11. List kormila 11
Slika 12. Konstrukcija krme broda 11
Slika 13. Pult za kormilarenje 12
Slika 14. Izrada pulta za kormilarenje 13
Slika 15. Gotova konstrukcija nastavne makete 14
Slika 16. Pneumatski cilindar 16
Slika 17. Simbol pneumatskog dvoradnog cilindra[5] 16
Slika 18. Načini aktiviranja razvodnika [5] 18
Slika 19. Električki aktivirani 3/2 razvodnik 18
Slika 20. Prigušni ventil [5] 19
Slika 21. Način rada kutnog enkodera [7] 20
Slika 22. Odabrani kutni enkoder 21
Slika 23. Pretvarač napona i sklopnik 22
Slika 24. Relejni modul 23
Slika 25. Stabilizator napona 23
Slika 26. Shema pneumatskog podsustava 24
Slika 27. Shema električkog podsustava 25
Slika 28. Unutrašnjost nastavne makete s postavljenim podsustavima krme broda 25
Slika 29. Arduino Uno modul [9] 26
Slika 30. Dio koda za korištenje timer-a 27
Slika 31. Dio koda u kojem se definiraju pinovi 28
Slika 32. Dio koda u kojem se definira glavna petlja programa 29
Slika 33. Dio koda u kojem se implementira P regulator 30

SAŽETAK

Regulacija kuta zakreta lista kormila broda završni je rad napravljen u svrhu prezentacije kormilo stroja broda (pogona za kormilarenje većim brodovima). Rad se sastoji od projektiranja, izrade te programiranja stolne makete koja posjeduje pneumatski pogon za razliku od realnih sustava koji su zbog mnogo većih sila pogonjeni hidraulički. Sustav se sastoji od: drvene krme broda, pneumatskog cilindra, dva elektropneumatska ventila, relejne pločice, mikrokontrolera, dva kutna enkodera, stabilizatora napona te pretvarača napona. Sustav funkcionira tako da automatski prati željeni kut otklona kormila koji zadaje korisnik. Posebna pažnja posvećena je regulaciji sustava koja je ostvarena implementacijom P regulatora u mikrokontroleru. P regulator po izračunatoj pogrešci koju računa pomoću signala sa senzora odlučuje koji elektropneumatski ventil otvoriti i time pomaknuti cilindar. Ovakav sustav idealan je za prezentaciju i edukaciju studenata iz područja elektropneumatike.

Ključne riječi: list kormila broda, pneumatski pogon, hidraulički pogon, pneumatski cilindar, elektropneumatski ventil

SUMMARY

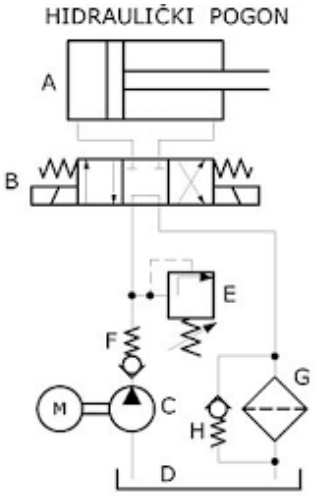
Angular position control of a ship rudder blade is a final project made for purpose of presenting the rudder system of a ship (the system that controls the course of the ship). The final project consists of designing, constucting and programming of a ship model that has a pneumatic drive as opposed to real systems that are hydraulically driven due to much higher forces. The system consists of: wooden ship model, pneumatic cylinder, two electro-pneumatic valves, relay module, microcontroller, two angular encoders, voltage stabilizer and voltage converter. The system functions by automatically following the desired deflection angle set by the user. Special attention was paid to the control of the system, which was realized by the implementation of the P controller in the microcontroller. The P controller calculates the control error by the signals from the sensors and makes decision which electro-pneumatic valve to open and thereby move the cylinder. This system is ideal for presenting electropneumatics to students and for their education in said field.

Key words: ship rudder blade, pneumatic drive, hydraulical drive, pneumatic cylinder, electro-pneumatic valve

1. UVOD

1.1. Osnovne značajke hidrauličkog pogona

Hidraulika je dio pogonske tehnike koja se bavi rješavanjem pogonskih problema putem pretvorbe, upravljanja, regulacije i prijenosa energije putem tekućeg stlačenog medija. Hidraulika energiju i informacije prenosi putem stlačene tekućine (kapljevine), a dijeli se na hidrodinamiku i hidrostatiku. U hidrodinamici energija se prvenstveno prenosi kinetičkom energijom fluida u strujanju, dok se u hidrostatici energija prenosi isključivo tlakom fluida. Ono što danas u hrvatskom jeziku zovemo hidraulika odnosi se u pravilu na sustave, strojeve i uređaje koji rad temelje na principu hidrostatike. Osnovna prednost hidraulike jest gustoća snage njenih strojeva, odnosno odnos gabaritnih mjera strojeva te snage koju posjeduju. Kao glavni nedostatak može se spomenuti ulje kao ekološki ne prihvatljiv medij ili čak nepoželjan u slučaju opasnih zona zapaljenja. Hidraulika danas upotrebu pronalazi prvenstveno u transportu, ali i u ostalim granama tehnike poput proizvodne tehnike, procesne tehnike ili robotike.[1]



Slika 1. Osnovni hidraulički krug [2]

A – hidraulički cilindar

B – Elektromagnetski razdjelni ventil

C – Hidraulička pumpa

D – Spremnik hidrauličkog ulja

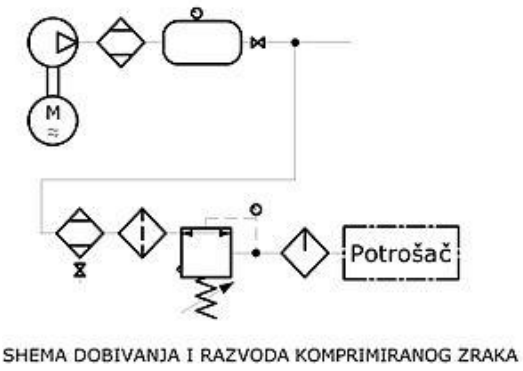
E – Prekotlačni ventil

F, H – Nepovratni ventili

G – Filter ulja

1.2. Osnovne značajke pneumatskog pogona

Pneumatika je tehnička grana koja se bavi iskorištavanjem energije stlačenog zraka uz pomoć mehaničkih uređaja. Pneumatski sistemi se u pravilu sastoje od kompresora, cjevovoda, pneumatskih ventila te aktuatora u vidu linijskih pneumatskih cilindara ili cilindara za rotacijsko gibanje. Danas je pneumatika prisutna u raznim tehničkim granama poput: prometa, serijske proizvodnje i robotike. Najčešći pneumatski sustavi su pneumatski manipulatori čija je prednost mogućnost izvođenja raznih operacija rukovanja te brzina rada, dok su nedostaci sile koje se u pneumatici mogu postići. Za razliku od hidraulike koja koristi nestlačivu kapljevinu za medij, u pneumatici zrak je stlačiv što stvara određene poteškoće pri problemima pozicioniranja. Druga razlika je u radnom tlaku koji je kod pneumatike uglavnom do 1 MPa, dok se u hidraulici tlakovi kreću od 7 do 35 MPa ili iznimno i više. Te dvije razlike razlog su zašto danas hidraulika prednjači kao rješenje u preciznoj tehnici i tehnici koja zahtjeva velike snage. Pneumatika ima svoje prednosti u vidu ekološki prihvatljivog medija što je čini primjenjivom u industrijama poput prehrambene ili farmaceutske industrije. Važno je spomenuti da za zrak kao medij nije potrebno imati spremnik niti cjevovode dovoda do kompresora ili povrata u spremnik kao što je to slučaj kod hidraulike.[3]



Slika 2. Pneumatski sustav [4]

1.3. Inspiracija

Inspiracija za ovaj završni rad prvenstveno je Laboratorij za automatiku i robotiku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u kojem se nalaze mnogobrojni studentski završni radovi u području pneumatike. Također inspiracija se nalazi u dugogodišnjem iskustvu kormilarenja brodom te poznavanja brodskog sustava za kormilarenje.

1.4. Općenito o sustavu za kormilarnje brodom

Sustav za kormilarenje brodom čini sklop uređaja i prijenosnika informacija od mjesta upravljanja brodom (kormilarnice) do kormilo stroja (mjesta u strojarnici broda gdje se nalazi aktuator sustava). Uloga ovoga sistema na brodu jako je važna, jer se njime izravno utječe na smjer gibanja broda što je razlog posjedovanja dva nezavisna sustava kormilarenja na većim brodovima. Najčešće je to slučaj gdje je jedan sustav elektro-hidraulički, a drugi mehanički. Podsustave čine: kormilo, prijenosnik informacija, hidraulički agregat, elektromagnetski hidraulički ventil, hidraulički cilindar, polužni sistem te list kormila.

Kormilo je najčešće drvena konstrukcija kružnog oblika smještena na stupu u kormilarnici čijim zakretanjem čovjek unosi željeni otklon lista kormila broda.

Prijenosnik informacija kod mehaničkih sustava je čelična žica što je i najsigurniji način prenosa informacije. Žica je provučena od kormilarnice do kormilo stroja, na taj način se pomak dobiven njenim namotavanjem na sustavu kormila prenosi do kormilo stroja.

Hidraulički agregat obično se sastoji od elektromotora i hidrauličke pumpe. Elektromotor pogoni pumpu te tlači ulje na radni tlak oko 30 MPa koje je medij u sistemu.

Elektromagnetski hidraulički ventil je elektroupravljani uređaj koji pomoću elektromagnetske kotve otvara i zatvara različite kanale koji određuju smjer kretanja radnog medija. To će biti objašnjeno u poglavlju „3. Odabir komponenti“.

Hidraulički cilindar je čelična konstrukcija koja se sastoji od osovine te dvije komore za radni medij. Strujanjem medija u određenu komoru cilindra dobiva se linijski pomak osovine cilindra u jednu ili u drugu stranu u slučaju strujanja u drugu komoru.

Polužni sistem je čelični sistem poluge koji pretvara linijsko gibanje cilindra u rotacijsko gibanje vratila lista kormila.

List kormila je drvena ili češće čelična pločasta konstrukcija koja je postavljena pod kutem od 90 stupnjeva u odnosu na ravninu rotacije propelera broda. Uležištena je aksijalno radijalnim ležajem na peticu broda (produžetak kobilice broda namijenjen uležištenju lista kormila) te radijalnim ležajem smještenim u oplati broda. U srednjem položaju list kormila ne stvara nikakav otpor propulziji propelera i brod se kreće pravocrtno. Pomicanjem lista za određeni kut u jednu od strana stvara se otpor propulziji na toj strani što rezultira skretanjem broda u tu stranu.



Slika 3. Kormilo stroj

Slika 3. prikazuje kormilo stroj koji je smješten u krmi ribarskog broda dužine 25 m. Brod ima pogonski motor snage 470 kW koji preko reduktora i osovinskog voda vrti propeler promjera 1600 mm te ostvaruje brzinu plovidbe od 13 čv. Na slici se vide i neki podsustavi sustava za kormilarenje kao što su hidraulički agregat, elektomagnetski ventil (lijevo), hidraulički cilindar te polužni sistem (desno). Također se može vidjeti završetak vratila lista kormila na kojem je zavaren polužni sistem te hidraulički vodovi za dovod i odvod medija od cilindra. Medij sistema je ulje kojeg ima oko 10 l. Hod hidrauličkog cilindra je 450 mm što preko polužnog sistema ostvaruje rotacijski pomak lista kormila za 40 stupnjeva u svaku stranu.



Slika 4. Propeler i list kormila broda

1.5. Cilj završnog rada

Cilj ovog završnog rada je vjerno prikazati veliki sustav za kormilarenje brodom na maloj laboratorijskoj maketi krme broda koja će sadržavati sve ključne elemente sustava za kormilarenje te na taj način prikazati način rada ovog sustava svim studentima i ostalim zainteresiranima koji ga nisu bili u mogućnosti vidjeti. Zbog jednostavnosti, ali i cijene komponenti odlučeno je izraditi pneumatski pogonjen sustav što neće narušiti prezentaciju sustava za kormilarenje, jer je jedina razlika u radnom mediju.

2. IZRADA NASTAVNE MAKETE

2.1. Projektiranje i izrada konstrukcije krme broda

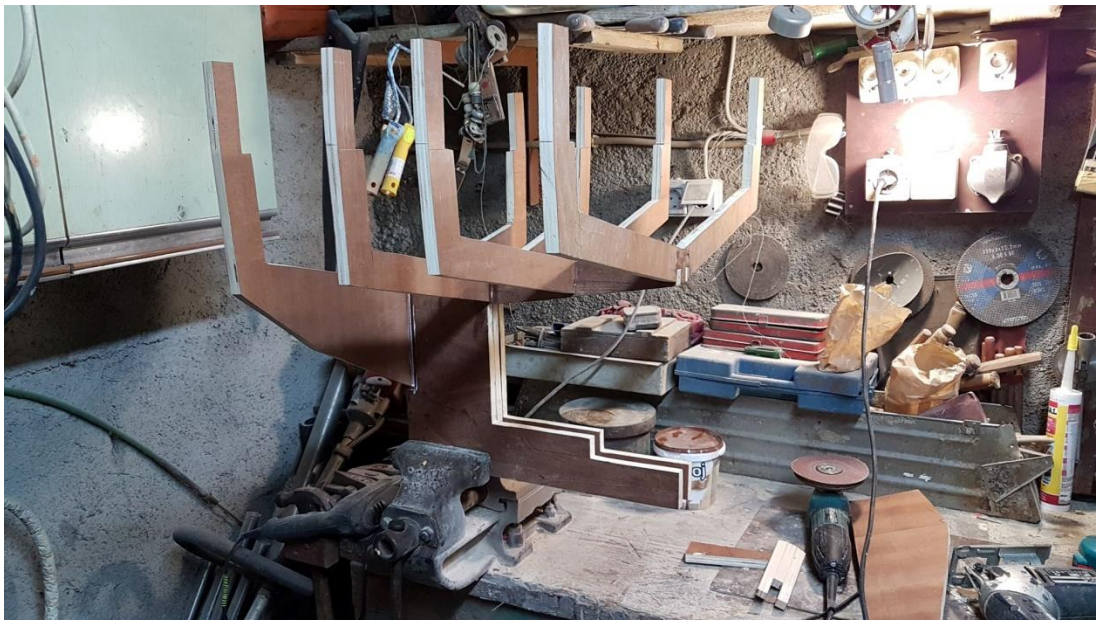
Trup svakog broda, pa tako i ove makete, sastoji se od tri glavna dijela: kobilica, rebra te oplata broda. Pri izgradnji broda najprije se polaže kobilica. Kobilica je najdonji i najjači dio broda koji se proteže od pramca do krme. U nastavku gradnje služi kao nosač za rebra broda. Rebra broda su poprečni profili koji se postavljaju na kobilicu od pramca prema krmi u određenom razmaku. Kod brodova dužine tridesetak metara taj razmak kreće se do uglavnom jednog metra. Rebra svojom promjenom vanjske zakrivljenosti te gabarita određuju krajnju liniju i oblik broda. Oplata broda je zadnji dio konstrukcije trupa, kod čeličnih brodova to su limovi debljine od 8 do 20 mm koji se postavljaju na rebra te zatvaraju vanjsku površinu trupa.



Slika 5. Gradnja čeličnog trupa broda

Na slici 5. može se vidjeti kako izgleda gradnja čeličnog broda te postavljanje rebara i oplate na pramcu broda.

Nastavnu maketu krme broda odlučeno je napraviti od drveta, što je najpraktičnije i najjeftinije rješenje. Za izradu drvene konstrukcije poslužila je obiteljska radiona studenta gdje su se izrađivala i postavljala rebra. Rebra je najprije potrebno projektirati, a glavni uvjet na gabarite nastavne makete ujedno i dimenzije rebara bile su dimenzije i hod pneumatskog cilindra koji se koristi u sustavu. Nakon što su izračunate dimenzije rebara, napravljene su papirnate šablone 4 rebra broda. Svi dijelovi izrađivani su od prešanih drvenih ploča debljine 15 mm. Potom je prema šablonama rebara izrađena kobilica broda na koju su postavljena rebra učvršćena vijcima te ljepilom za drvo.



Slika 6. Rebra postavljena na kobilicu broda

Na svakom rebru projektirani su pragovi od 10 mm na koje se oslanja paluba broda. Nakon brušenja pragova uslijedila je izrada šablone za palubu broda koja je izrađena iz prešane drvene ploče debljine 6 mm. Na palubi broda projektiran je otvor koji ne postoji na realnoj konstrukciji broda, dok će na pokaznoj maketi pružati mogućnost pogleda na sustav za kormilarenje u unutrašnjosti krme broda. Paluba je postavljena i na pragove, učvršćena vijcima te ljepilom za drvo, što se vidi na sljedećoj slici.



Slika 7. Postavljanje palube

Nakon što je postavljena i prebrušena paluba te par pomoćnih rebara na stražnem dijelu broda moglo se početi s izradom oplate broda. Za izradu oplate poslužile su drvene letvice dimenzija 6x1x800 mm koje su savitljive što je iznimno važno jer omogućava njihovo postavljanje na rebra bez potrebe za grijanjem drva. Letvice su postavljane redom od gornjeg dijela rebara prema koblici broda, a učvršćne su pomoću čavlića na mjestima gdje idu preko rebara te su nakon postavljanja premazane s više slojeva ljepila za drvo zbog kompaktnosti.

Na trupu broda također je predviđeno ostaviti dva dijela bez oplate radi mogućnosti pogleda u unutrašnjost. Jedan otvoreni dio ostavljen je na krmenom čelu s desne strane ispod palube koji omogućuje pogled na rad cilindra tijekom upravljanja kormilom, dok je drugi s desne bočne strane i prikazuje rebra broda. Način postavljanja letvica oplate broda može se vidjeti na sljedećoj slici.



Slika 8. Postavljanje oplate

Nakon što je oplata postavljena bilo je potrebno popraviti neravnine na oplati nastale zbog velikog broja letvica te neidealnih linija rebara. To je riješeno nanošenjem par slojeva akrilnog kita te brušenjem istog pomoću brusnog papira. Sljedeća slika prikazuje izgled oplate prije i poslije nanošenja sloja kita.



Slika 9. Nanošenje akrilnog kita

U unutrašnjosti krme bilo je potrebno napraviti platforme na koje će se učvrstiti pneumatski cilindar te ostala oprema što je izrađeno u obliku kutijastih konstrukcija od drvene ploče koja se koristila za rebra. Kutijaste konstrukcije postavljene su između rebara broda te učvršćene za rebra vijčanim spojevima.



Slika 10. Cilindar postavljen na svoje nosače

Na slici 10. vidi se pneumatski cilindar koji je postavljen na svoju poziciju. Za njegovo smještanje bilo je potrebno napraviti 2 nosača. Nosači su izrađeni iz čeličnog L profila debljine 5 mm. Može se vidjeti da desni nosač sadrži i vodilicu koja će spriječiti rotaciju osovine cilindra koja je omogućena zbog njegove kružne konstrukcije. Nakon što je postavljen cilindar kreće se s izradom lista kormila. List kormila izrađen je na način da se list izrezan iz čeličnog lima debljine 1 mm zavaruje na čeličnu šipku promjera 10 mm koja je uležištena u bakrenim kliznim ležajima u petici broda te oplati. Čelična konstrukcija lista presvučena je drvenim dijelom zbog ljepšeg izgleda, a na taj način list ima dovoljnu čvrstoću da izdrži sve trzaje koje će potencijalno pruzročiti pneumatski cilindar.



Slika 11. List kormila

Nakon izrade lista kormila slijedila je izrada brodskih opasa te krmenih oka na oplati. Po završetku izrade krmena konstrukcija spremna je za nanošenje boje.



Slika 12. Konstrukcija krme broda

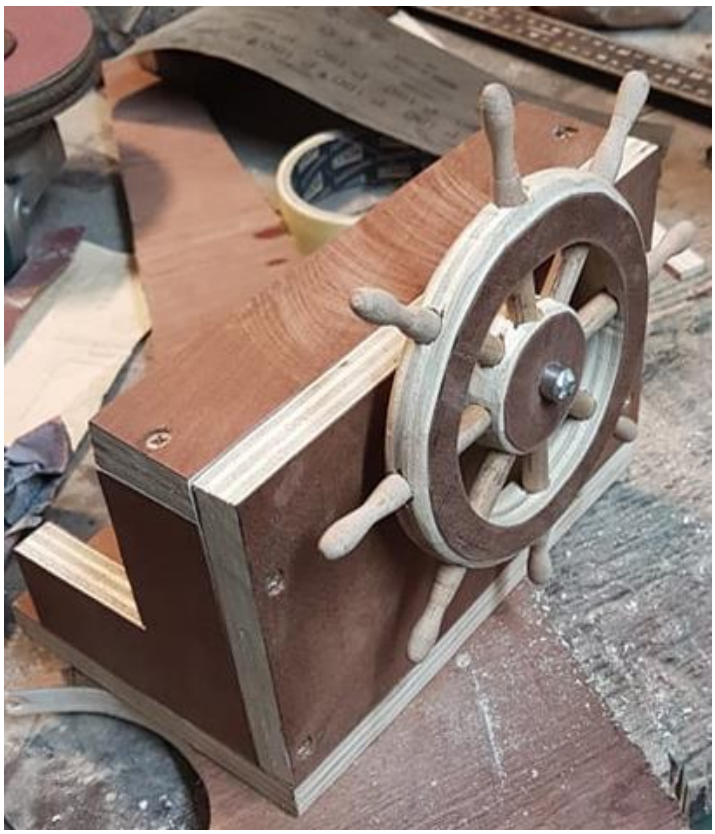
2.2. Izrada makete pulta za kormilarenje

Pult za kormilarenje je dio kormilarnice broda koji sadrži sve instrumente potrebne za brodsku navigaciju poput: radara, brodske busole, elektroničkih karti te raznih sonara. Najvažniji dijelovi pulta su naravno komande za upravljanje pogonskim motorom ili motorima broda te pomoćnim motorima za bočno pozicioniranje i kormilo kojim se upravlja željenim kursom kretanja broda. Na sljedećoj slici može se vidjeti realni navigacijski pult na već spomenutom ribarskom brodu za vrijeme noćne navigacije.



Slika 13. Pult za kormilarenje

Na nastavnoj maketi pult je izrađen iz već spomenute drvene ploče, dok je kormilo izrađeno iz kružnog drvenog oblika te tokarenih drvenih šipki promjera 8 mm. Kormilo je postavljeno na vratilo napravljeno iz čelične šipke debljine 10 mm koja je uležištena u bakrenom kliznom ležaju u stranici pulta. Da bi se mogao očitati željeni uneseni kut otklona kormila bilo je potrebno na osovinu kormila pričvrstiti senzor čija je osovinica promjera 5 mm. Za to je posebno projektirana čelična spojka tokarena iz čelične šipke u koju ulaze obe osovine te se stežu vijcima. Na taj način zakretanjem kormila korisnik okreće i senzor koji šalje informaciju o željenom otklonu u mikrokontroler. Detaljnije opisano u poglavlju „4. Upravljanje“.



Slika 14. Izrada pulta za kormilarenje

2.3. Bojenje nastavne makete i postavljanje na nosač

Kad su izrađeni svi dijelovi konstrukcije završeni su grubi radovi i počinje se s bojanjem makete. Za bojanje nadvodnog dijela broda koristi se obična boja za drvo nanošena kistom, dok se za bojenje podvodnog dijela broda koristi prajmer premaz za čelične konstrukcije zbog svoje karakteristične boje koja nalikuje na boju premaza za podvodnu zaštitu konstrukcije broda. Krenulo se s bojanjem unutrašnjosti konstrukcije jer je to najzahtjevniji dio zbog nepristupačnosti. Potom su obojeni brodski opasi u bijelu boju. Nakon toga sljedi bojenje nadvodnog dijela oplate broda u plavo te na kraju bojanje podvodnog dijela oplate broda. Obojena konstrukcija krme broda te maketa pulta za kormilarenje postavljeni su na nosač koji je izrađen iz prozirnog pleksiglasa debljine 10 mm. Sastavljenu nastavnu maketu može se vidjeti na idućim slikama.





Slika 15. Gotova konstrukcija nastavne makete

3. ODABIR KOMPONENTI

3.1. Opis i karakteristike komponenti

Pri odabiru komponenti za ovaj završni rad nismo bili u mogućnosti velikog izbora vrsti i karakteristika komponenata, jer je bilo na raspolaganju ono što smo posjedovali u našem laboratoriju za hidrauliku i pneumatiku na fakultetu. Tako se odabir ostalih komponenti prilagodio odabiru pneumatskog cilindra kao aktuatora u sustavu čemu se je prilagodila i konstrukcija makete što je već spomenuto ranije.

3.1.1. Pneumatski cilindar

Pneumatski cilindar je najčešći izvršni element u pneumatskim sustavima. U pricipu gibanje koje se postiže radom cilindra linijske (translacijske) je karakteristike, jedino kod zakretnih cilindara imamo slučaj rotacijskog gibanja. Stupanj korisnog djelovanja obično se kreće u granicama između 70% i 90%. Klipnjača i košuljica najčešće su čelični dijelovi, rjeđe košuljica može biti izrađena od aluminija ili bronce. Prema načinu djelovanja pneumatski cilindri mogu se podijeliti na: [5]

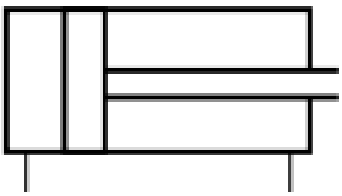
- jednoradni
- dvoradni
- posebne izvedbe:
    - tandem
    - višepoložajni
    - teleskopski
    - bez klipnjače (najčešće magnetni)
    - udarni

Pneumatski cilindri mogu biti jednoradni i dvoradni. Jednoradni cilindri imaju mogućnost vršenja korisnog rada samo u jednu stranu, dok dvoradni cilindri mogu ostvariti i vučnu i tlačnu silu. Prema izvedbi cilindri mogu biti membranski i klipni, a u dokumentaciji jedni i drugi označuju se istim simbolom.[5]

Za izradu ovog pneumatskog sistema poslužio je pneumatski cilindar oznake C95SDB160-100 tvrtke SMC. Riječ je o dvoradnom cilindru predviđenom za radni tlak do 1 MPa s hodom osovine od 100mm. Detaljnije o cilindru može se pronaći u katalogu proizvođača.[6]



Slika 16. Pneumatski cilindar



Slika 17. Simbol pneumatskog dvoradnog cilindra[5]

3.1.2. Elektropneumatski ventili

Ventili su pneumatski upravljački elementi za regulaciju i usmjeravanje radnog medija. Moguće funkcije ventila uključuju: propuštanje, zaustavljanje ili promjenu smjera medija; regulaciju protoka i tlaka. Općenito, ventile je moguće podjeliti na:

- razvodnike
- zaporne ventile
- protočne ventile
- kombinirane ventile
- tlačne ventile
- cijevne zatvarače

S obzirom da će se u ovom završnom radu koristiti isključivo razvodnici i protočni ventili u nastavku ćemo opisati samo njih.

Razvodnici u pneumatskim sistemima služe da usmjeravaju tok stlačenog zraka propuštanjem, zatvaranjem ili promjenom smjera toka. Razvodnike možemo razlikovati po sljedećim karakteristikama:

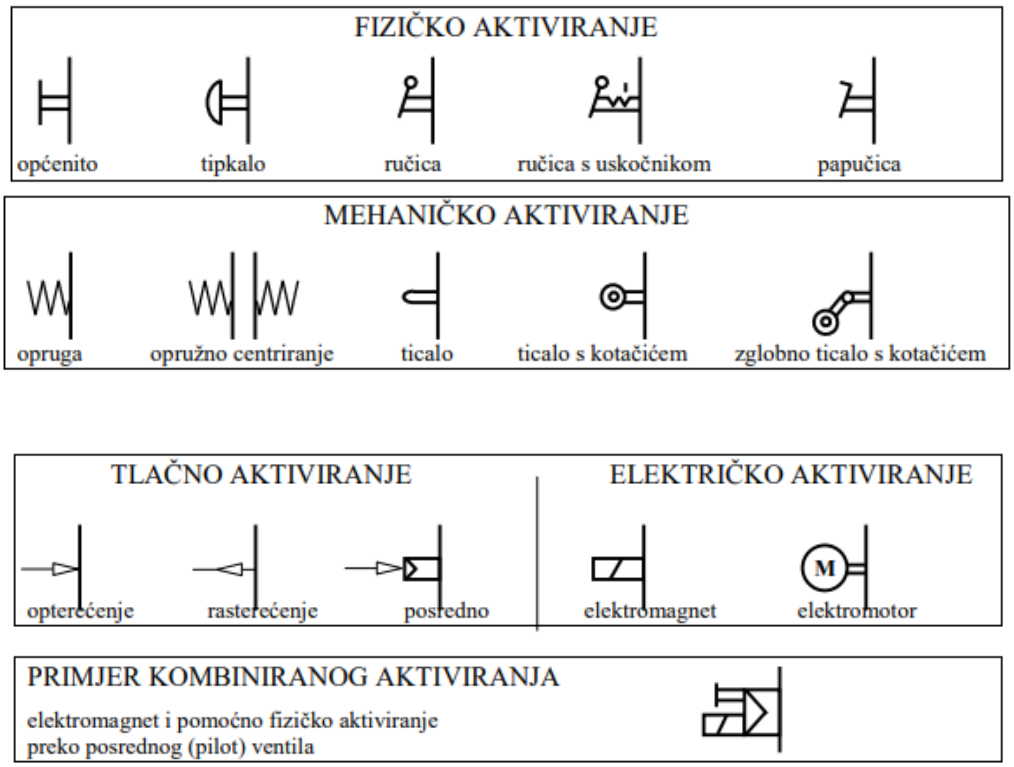
- tip
- veličina
- način aktiviranja
- duljina trajanja signala
- konstrukcija

Tip razvodnika određen je brojem priključka i razvodnih položaja. Oznaka tipa razvodnika sastavlja se po primjeru „3/2 razvodnik“ što bi značilo da razvodnik ima tri priključka za pneumatske vodove te dva razvodna položaja.

Veličina razvodnika definirana je nazivnim promjerom priključnog mjesta za pneumatske vodove, a definira se prema potrebnom protoku radnog medija.

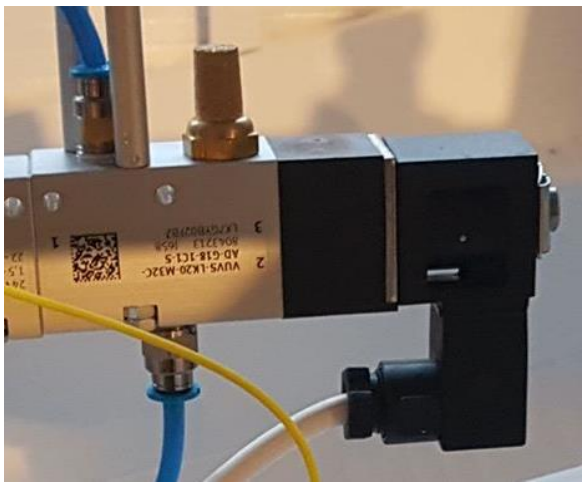
Način aktiviranja može biti neposredan ili posredan, a neposredne načine aktiviranja možemo podijeliti na: [5]

- fizičko
- mehaničko
- tlačno
- električko
- kombinirano



Slika 18. Načini aktiviranja razvodnika [5]

Na ovom pneumatskom sustavu odabrani su električki aktivirani 3/2 razvodnici tvrtke Festo oznake VUVS-LK20-M32C-AD-G18-1C1-S. Riječ je o tzv. on/off razvodnicima koji imaju mogućnost ili zatvoriti ili pustiti maksimalni protok zraka. Upravljani su digitalnim naponskim signalom amplitude 24 V. Potrebno je imati dva ovakva razvodnika, jer se koristi dvoradni pneumatski cilindar.

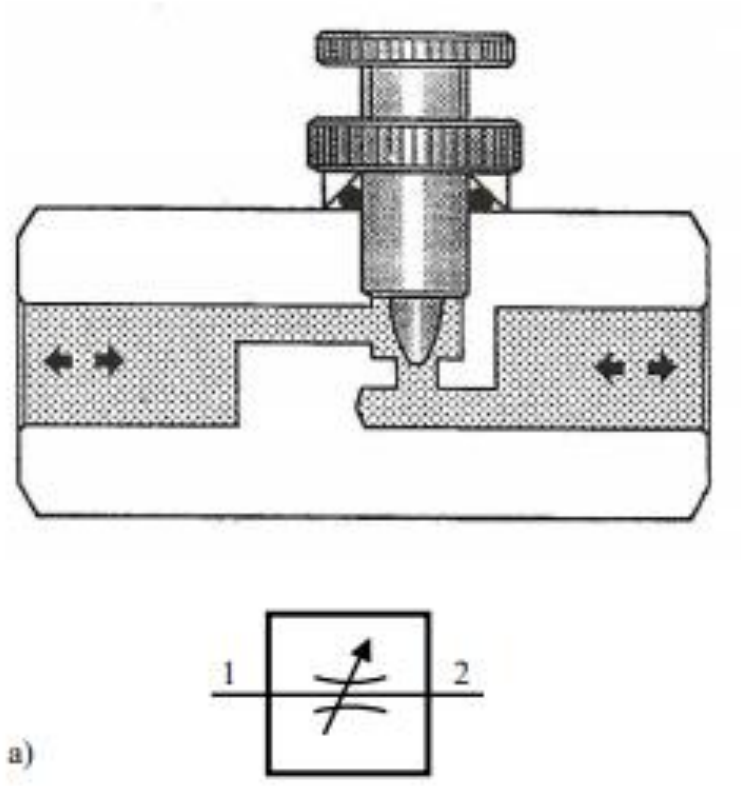


Slika 19. Električki aktivirani 3/2 razvodnik

Protočni ventili djeluju na protok radnog fluida čime posredno djeluju i na fizikalne veličine ovisne o protoku odnosno brzini strujanja radnog medija. Koriste se dva tipa protočnih ventila:

- prigušni (prigušuju u oba smjera)
- jenosmjerni-prigušni (prigušuju u jednom smjeru)

Prigušno djelovanje ostvaruje se suženjem (prigušnicom, blendom) koja predstavlja otpor strujanju fluida (izaziva pad tlaka). Na ovom pneumatskom sustavu koristi se prigušni ventil na glavnom vodu koji dolazi s kompresora kako bi smanjio protok radnog fluida te time i brzinu hoda pneumatskog cilindra.[5]

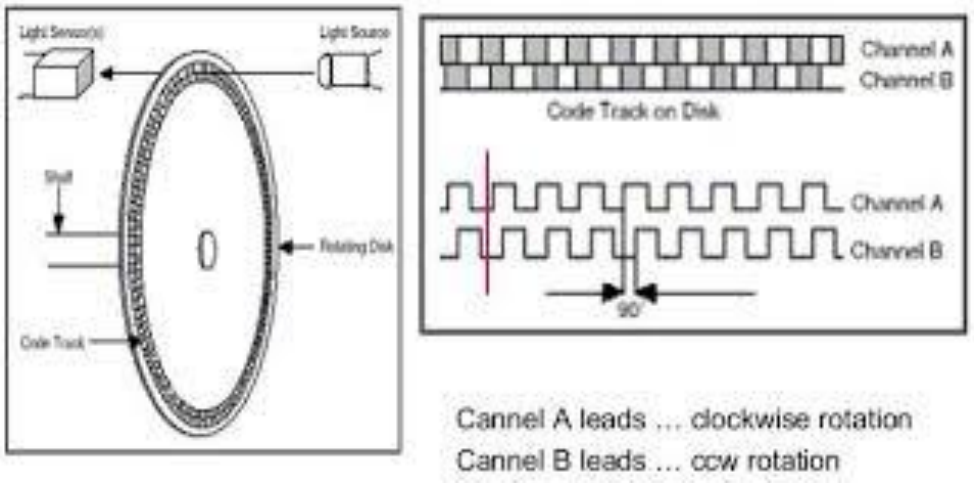


Slika 20. Prigušni ventil [5]

3.1.3. Senzori

Snezori su još jedna komponenta bez koje ovakav sustav ne bi mogao funkcionirati. Naime, potrebno je na neki način željeni kut otklona lista kormila unesen na kormilu te stvarni kut otklona lista kormila pretvoriti u digitalni oblik koji je razumljiv mikrokontroleru koji će se koristiti za upravljanje sustavom. Za taj problem nađeno je rješenje u vidu digitalnih kutnih enkodera (*eng. Rotary encoder*).

Digitalni kutni enkoderi su uređaji koji na svojoj osovini posjeduju tamni tanki kružni zastor sa zazorima koji propuštaju svjetlost gusto cirkularno raspoređenim po rubu kružnog zastora. Na temelju dva para fototranzistora i fotodioda cirkularno razmaknutih moguće je brojiti pulseve na fototranzistoru koji nastupaju kad kroz zazor prođe svjetlost s fotodiode. Pretvorbom tako nastalog digitalnog signala moguće je mjeriti poziciju i brzinu uređaja na koje se kutni enkoder pričvrsti. Način rada i izgled signala kutnog enkodera može se vidjeti i sa sljedeće slike.



Slika 21. Način rada kutnog enkodera [7]

Za ovaj sistem odabrani su kutni enkoderi koji mogu dati 600 digitalnih impulsa po jednom okretaju što je skoro dva pulsa po stupnju zakreta, a to je više nego dovoljna razlučivost za ovaj sistem jer pri regulaciji kuta zakreta kormila broda nema potrebe za preciznošću regulacije koja zahtjeva da maksimalno dopušteno odstupanje od referentne veličine bude manje od jednog stupnja.



Slika 22. Odabrani kutni enkoder

3.1.4. Pretvarač napona

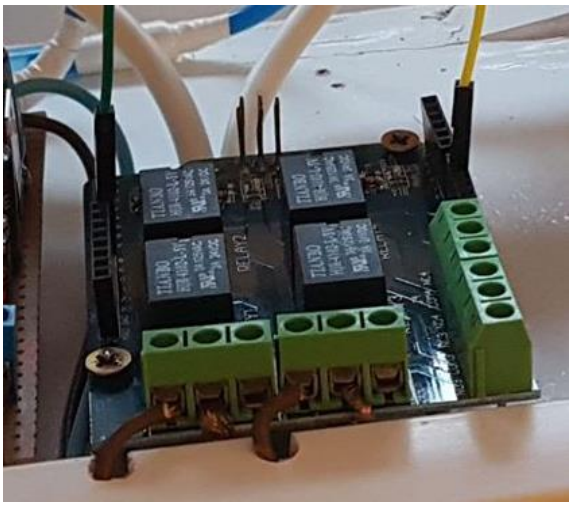
Kako je spomenuto ranije odabrani razvodnici električki su aktivirani digitalnim naponskim signalom amplitude 24 V, što znači da na maketi treba imati zadani napon. Taj problem najjednostavnije je riješiti spuštanjem napona sa napona mreže od 220 V. Za to će biti potreban pretvarač napona, uređaj koji će izmjenični napon mreže pretvarati u istosmjerni napon potreban za aktivaciju razvodnika. Odabran je model pretvarača oznake MDR-60-24 koji podnosi maksimalnu struju do 2.5 A. Na sljedećoj slici može se vidjeti pretvarač napona te sklopnik koji omogućuje da sustav ne bude stalno pod naponom već samo onda kada to korisniku treba, neovisno o tome što je sustav stalno povezan na mrežu.



Slika 23. Pretvarač napona i sklopnik

3.1.5. Relejni modul

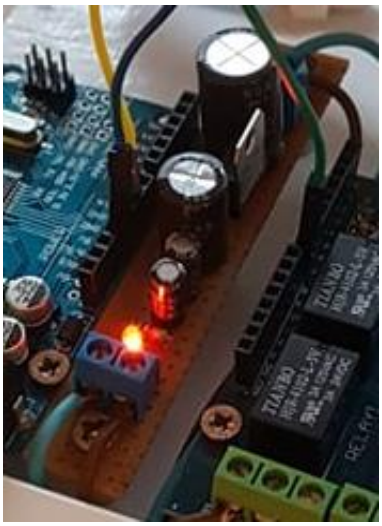
Za upravljanje ovog sustava koristi se mikrokontroler koji na svojim digitalnim izlazima daje napon amplitude 5 V što nije dovoljno za aktivaciju odabranih razvodnika. Zato smo na maketu doveli vanjsko napajanje od 24 V. Poveznica između ove dvije naponske razine riješena je relejnim modulom koji posjeduje 4 relejna sklopnika od kojih će se koristiti samo 2. Svaki za svoj razvodnik. Relejni sklopnik u serijskom je spoju s razvodnikom tako da po dolasku napona od 5V s mikrokontrolera na relej i okidanju releja dovodimo napon od 24 V na razvodniku. Detaljnije o mikrokontroleru može se vidjeti u poglavlju „4. Upravljanje“, a više o karakterisikama relejne pločice te načinu ožičavanja može se pronaći u navedenoj literaturi. [8]



Slika 24. Relejni modul

3.1.6. Stabilizator napona

Još jedan od izazova koji se pojavio kroz projektiranje ovog sustava bio je izvor napajanja za mikrokontroler odnosno istosmjerni napon od 12 V. Budući je na maketu već doveden istosmjerni napon amplitude 24 V odlučeno je projektirati stabilizator napona koji će stabilizirati napon od 24 V na napon od 12 V potreban mikrokontroleru. Pločica koja sadrži stabilizator te par kondenzatora koji služe eliminiranju oscilacija napona je vlastite izrade. Također, na pločicu je postavljena jedna dioda koja signalizira prisutnost stabiliziranog napona na izlazu



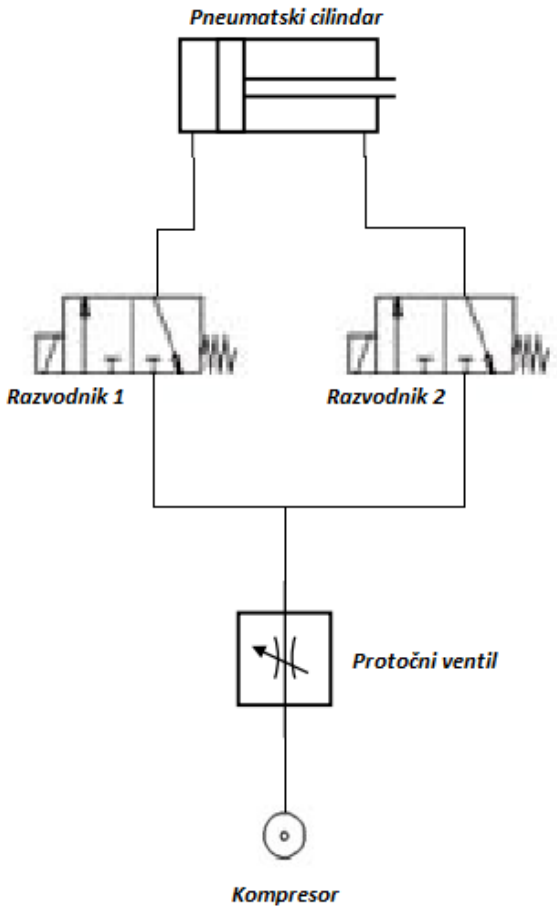
Slika 25. Stabilizator napona

3.1.7. Priprema stlačenog zraka

Zadnja, ali ne manje važna komponenta je napajanje makete stlačenim zrakom. Za to se koristi kompresor koji tlači zrak do 10 bara. Zbog visoke cijene ova maketa to ne posjeduje već je predviđeno spajanje same makete na kompresor u laboratoriju. Ostale komponente su električni vodovi u obliku bakrenih žica te pneumatski vodovi u obliku plastičnih cijevi.

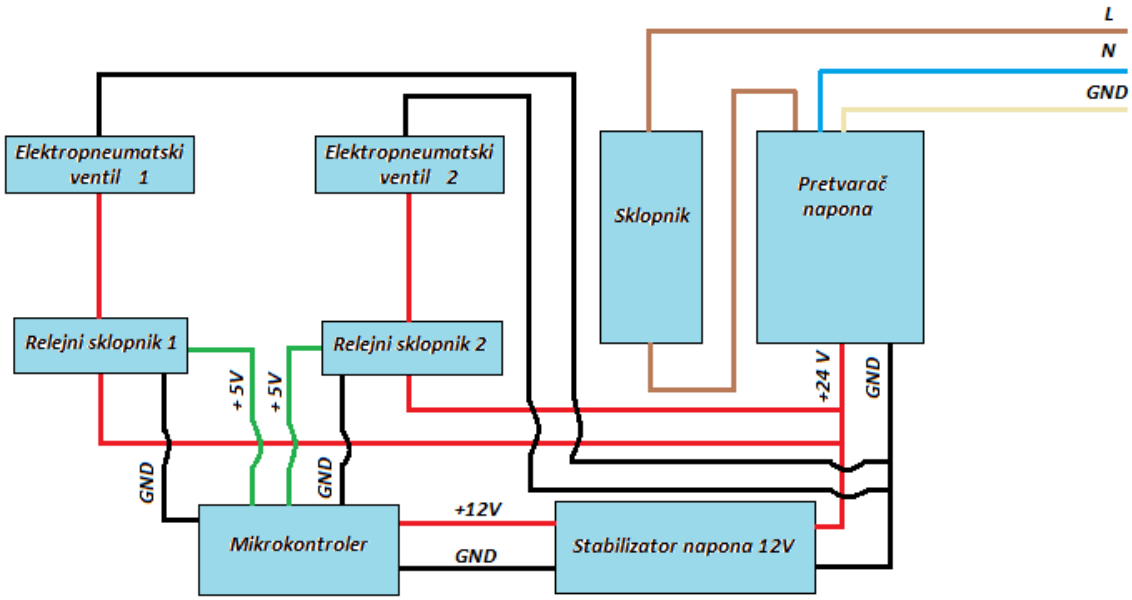
3.2. Spajanje komponenti i postavljanje na nastavnu maketu

Sistem se sastoji od dva podsustava pneumatskog i elektičkog čija se poveznica nalazi u električki aktiviranim pneumatskim razvodnicima. Nakon odabira i izrade svih potrebnih komponenti uslijedilo je postavljanje pneumatskih komponenti na svoja mjesta u konstrukciji krme broda te njihovo spajanje pneumatskim vodovima po sljedećoj shemi.



Slika 26. Shema pneumatskog podsustava

Nakon postavljanja i spajanja svih pneumatskih komponenti potrebno je postaviti električke komponente te ih ožičiti po sljedećoj shemi.



Slika 27. Shema električkog podsustava

Nakon što su na konstrukciju krme broda postavljena oba podsustava unutrašnjost makete izgleda kao na idućoj slici.



Slika 28. Unutrašnjost nastavne makete s postavljenim podsustavima krme broda

4. UPRAVLJANJE

4.1. Ostvarenje upravljanja sustava

U ovom poglavlju pokušat će se objasniti zamišljena ideja upravljanja sustavom te način na koji je to izvedeno, također će biti rečeno nešto više o korištenom mikrokontroleru. U projektiranju ovog sustava cilj je bilo da list kormila broda automatski prati željeni otklon koji korisnik nastavne makete unosi na kormilu. To je rješeno na način da su postavljena dva kutna enkodera, jedan na osovinu kormila i drugi na osovinu lista kormila. Postavljeni senzori mjere kutove otklona i šalju ih u mikrokontroler koji izračunava grešku otklona. Po izračunatoj grešci implementirani P regulator preko relejnog modula upravlja otvaranjem pneumatskih razvodnika, a time i smjerom gibanja cilindra odnosno smjerom rotacije lista kormila. Time je zatvorena regulacijska petlja u sistemu.

4.2. Odabir mikrokontrolera

U načelu, mnogo je načina upravljanja ovakvog sistema, a postoji i mnogo vrsta mikrokontrolera koji bi se mogli koristiti za obavljanje zadatka, no jedan se ističe po svojoj jednostavnosti programiranja te niskoj cjeni. Za upravljanje sistema odlučeno je koristiti „Arduino Uno“ modul koji se temlji na Atmega328P mikrokontroleru. Modul posjeduje 14 ulazno-izlaznih priključaka od kojih 2 imaju mogućnost „interrupt“ rutine, 6 analognih ulazno-izlaznih priključaka, 16 MHz kvarcni kristal, USB vezu, priključak za napajanje, ICSP programator i reset tipkalo. Spomenuto je da je modul jednostavan za programiranje, a programira se u njegovom „Arduino Software-u“ što je opisano u sljedećem podpoglavlju „4.3. Implementacija P regulatora“. [9]



Slika 29. Arduino Uno modul [9]

4.3. Implementacija P regulatora

Kao što je spomenuto ranije implementacija P regulatora na Arduino modulu napravljena je pisanjem koda u arduino software-u. Kod za regulaciju ovog sistema sastoji se od dva dijela, i to: dijela koji preračunava digitalne signale sa senzora u stupnjeve te računa grešku otklona i dijela u kojem se implementira regulator.

```
#include <TimerOne.h>

int encoderKPin1 = 3;
int encoderKPin2 = 6;

int encoderLPin1 = 2;
int encoderLPin2 = 4;

int output9 = 9;
int output10 = 10;

volatile long encoderKValue = 0;
volatile long encoderLValue = 0;


float kutL = 0;
float kutK = 0;
volatile float e = 0;
```

Slika 30. Dio koda za korištenje timer-a

U prvom dijelu koda na početku potrebno je uključiti paket funkcija za korištenje *timer-a* koji će biti potreban za određivanje koliko često će mikrokontroler izvršiti zadanu regulacijsku petlju i time utjecati na sustav. Nakon toga izvršena je inicijalizacija korištenih pinova na modulu (pin 2, pin 3, pin 4, pin 6) te varijabli potrebnih u pisanju koda (kutL, kutK, e).

```
void setup() {
  Serial.begin (9600);

  pinMode(encoderKPin1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(encoderKPin2, INPUT_PULLUP);

  pinMode(encoderLPin1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(encoderLPin2, INPUT_PULLUP);

  pinMode(output9,OUTPUT);
  pinMode(output10,OUTPUT);

  digitalWrite(encoderKPin1, HIGH);
  digitalWrite(encoderKPin2, HIGH);

  digitalWrite(encoderLPin1, HIGH);
  digitalWrite(encoderLPin2, HIGH);

    Timer1.initialize(2000);
    Timer1.attachInterrupt(timerIsr);


attachInterrupt(1, updateEncoderK, RISING);
attachInterrupt(0, updateEncoderL, RISING);
  }
```

Slika 31. Dio koda u kojem se definiraju pinovi

U drugom dijelu koda na početku definira se serijska komunikacija s računalom, a potom se definira čemu koji pin služi naredbom „pinmode“. Nakon toga definira se vrijeme *timer-a* te ime funkcije koja će se izvršavati kad *timer* odbroji. Također su definirane dvije funkcije koje će se izvšavati kad pinovi „encoderKPin1“, „encoderKPin2“, „encoderLPin1“ ili „encoderLPin2“ postignu visoko stanje.

```
void loop(){
  Serial.println(e);
}


void updateEncoderK(){
  kutK = encoderKValue*18.0/600.0;
  int LSBK = digitalRead(encoderKPin2);

  if( LSBK == 1)encoderKValue ++;
  else encoderKValue --;
}

 void updateEncoderL(){
  kutL = encoderLValue*360.0/600.0;
  int LSBL = digitalRead(encoderLPin2);

  if( LSBL == 1)encoderLValue ++;
  else encoderLValue --;
}
```

Slika 32. Dio koda u kojem se definira glavna petlja programa

U ovom dijelu koda, počinje glavna petlja programa u kojoj imamo ispisivanje greške otklona na monitoru računala. U nastavku definirane su prije spomenute dvije funkcije koje uspoređuju dva digitalna signala sa senzora te odlučuju da li se broj pulseva sa senzora povećava ili smanjuje. Dobiveni broj pulseva preko gore navedenih izraza preračunava se u kut otklona. Može se vidjeti da kod varijable „kutL“ koja označava stvarni kut otklona lista to preračunavanje jest 1:1 odnosno cjeli kružni pomak na listu ostvaruje pomak od 360 stupnjeva u software-u , dok kod varijable „kutK“ koja definira zadani željeni otklon imamo preračunavanje u omjeru 20:1 što znači da kružni pomak kormila od 360 stupnjeva u software-u je kružni pomak od 18 stupnjeva, na taj način dobili smo situaciju da za manji zeljeni kut otklona lista kormila ipak treba više puta zaokrenuti kormilo kao što i je slučaj u realnom sustavu. Time se također malo ublažila dinamika referentne veličine u sustavu što će smanjiti broj trzaja cilindra.

```
void timerIsr()
{

  e = kutK-kutL;
  if (e > 1.0){
      digitalWrite(output10,HIGH);
      digitalWrite(output9,LOW);
      //Serial.print("pozitivno");
       }
    else if (e < -1.0) {
      digitalWrite(output9,HIGH);
      digitalWrite(output10,LOW);
      //Serial.print("negativna");
    }
    else {
      digitalWrite(output9,LOW);
      digitalWrite(output10,LOW);

    }

}
```

Slika 33. Dio koda u kojem se implementira P regulator

U zadnjem dijelu koda napisana je funkcija „timerIsr ( )“ koja se pokreće svaki put kada *timer* odbroji zadano vrijeme. U ovoj funkciji implementira se P regulator na način da se po izračunatoj grešci „e“ if-petljom provjerava karakter greške te prema tome postavljaju potrebna stanja (visoko/nisko) na izlaznim pinovima (output9, output10) koji su preko releja spojeni na ventile. Dozvoljena greška u regulaciji je 1 stupanj što znači ako je greška između vrijednosti -1 i 1 na izlaze se postavlja nisko stanje i sustav miruje, dok u slučaju greške veće od 1 ili manje od -1 postavlja se visoko stanje na potreban izlaz te na drugi nisko. Na taj način otvori se samo jedan ventil, dok drugi ostaje zatvoren i dobivamo pomak cilindra u stranu. Ova petlja vrti se u određenom vremenskom taktu te svaki puta utječe na sustav i ispravlja grešku regulacije.

4.4. Rezultati

U ovom potpoglavlju prokomentirati će se rezultati i rad sustava dobiven na opisan način. Prije spajanja pneumatskog podsustava po shemi koja je prikazana u poglavlju 3. izvor stlačenog zraka bio je spojen direktno na sustav bez prigušnog ventila. Zbog velikog protoka radnog medija dobila se velika brzina cilindra što je stvaralo probleme u radu sustava, jer na nastavnoj maketi nije bilo sile otpora kao kod realnog sustava koja bi se opirala gibanju cilindra. Zbog velike brzine gibanja cilindra, bez obzira što je vrijeme između dva ciklusa regulacije sustava reda veličine milisekundi, dobivao se veliki pomak cilindra što je izazvalo graničnu stabilnost sustava te sinusoidalnu karakteristiku kuta otklona lista kormila što nije bio cilj u projektiranju. S obzirom da na radnoj maketi nema sile koja bi smanjila brzinu cilindra u sustav je ugrađen prigušni ventil s kojim se utječe na brzinu cilindra. Nakon smanjenja brzine cilindra vremenska konstanta regulacije postala je manja od potrebnog vremena da cilindar izazove kutni pomak na osovini lista kormila veći od 1 stupnja što je omogućilo smirenje sustava na željenom referentnom otklonu bez prebačaja. Na ovaj način očito se prigušila dinamika sustava, ali to nije problem, jer kod sustava za kormilarenje nije potrebna brzina otklona već pouzdano praćenje referentnog otklona te potrebna sila svladavanja otpora propulzije broda. Pošto smo uspjeli dobiti cilj određen u projektiranju ostavili smo opisani P regulator što ne isključuje mogućnost da se u budućnosti pokuša implementirati i PID regulator koji bi također bio dobro rješenje za ovakav sustav.

5. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad izrađen je samostalno koristeći znanja stečena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu iz raznih kolegija poput: Hidraulike i pneumatike, Elementa konstrukcija, Senzora, Mikroprocesorskog upravljanja ili Projektiranja mikroprocesorskih sustava. Pokazane su vještine projektiranja, konstruiranja te programiranja mehatroničkih sustava. Ovaj elektropneumatski sustav izrađen je s ciljem da vjerno prikazuje realni hidraulički sustav za kormilarenje većim brodovima te pruži mogućnost upoznavanja s upravljačkim sustavom broda. Sustav se sastoji od dva podsustava: pneumatski (energetski) i električki (upravljački) podsustav. Glavne komponente su pneumatski cilindar, mikrokontroler i pločica s relejnim sklopnicima, dok je spona između dva podsustava elektropneumatski ventil. Maketa krme broda trenutno se nalazi u Laboratoriju za automatiku i robotiku gdje će služiti kao nastavna maketa za buduće studente i služiti u svrhu edukacije o elektropneumatskim sustavima.

LITERATURA

[1] Hidraulika, Joško Petrić, Zagreb, 2012.

[2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidrauli%C4%8Dki_pogon (pristupljeno 13.09.2019.)

[3] Pneumatika, G.Nikolić, 2008. (pristupljeno s https://hr.wikipedia.org/wiki/Pneumatika 13.09.2019.)

[4] https://www.mag-commerce.com/zastupnistva/industrijska-pneumatika/ (pristupljeno 13.09.2019.)

[5] Pneumatika i hidraulika, Radoslav Korbar, Karlovac, 2007.

[6] Katalog pneumatskih proizvoda, SMC (pristupljeno s https://www.smcpneumatics.com/pdfs/C95.pdf 14.09.2019.)

[7] http://www.hdodig.com/lectures/mechatronics/pred4.pdf (pristupljeno 14.09.2019.)

[8] https://store.arduino.cc/4-relays-shield (pristupljeno 15.09.2019.)

[9] https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3 (pristupljeno 15.09.2019.)

PRILOZI

I. CD-R disc