

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Andelo Živalj
Marin Lukas

Konstrukcija i vođenje daljinski upravljano podvodnog vozila

Zagreb, 2013.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava, pod vodstvom prof. dr. sc. Mladena Crnekovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2012./2013.

Popis slika

1.1	<i>Cutlet</i> [1]	1
1.2	<i>Nautilusum</i>	2
2.1	<i>Krivulja tečenja za PMMA u ovisnosti o temperaturi</i> [2]	5
2.2	<i>Proračunski model kupole</i>	6
2.3	<i>Proračunski model trupa</i>	6
2.4	<i>Maksimalno naprezanje kupole</i>	7
2.5	<i>Maksimalni progib kupole</i>	7
2.6	<i>Raspodjela naprezanja na kupoli pri dubini zarona 60 m</i>	8
2.7	<i>Raspodjela deformacija kupole pri dubini zarona 60 m</i>	8
2.8	<i>Maksimalno naprezanje trupa</i>	9
2.9	<i>Maksimalni progib trupa</i>	9
2.10	<i>Raspodjela naprezanja na trupu</i>	10
2.11	<i>Koncentracija naprezanja na mjestu zavara</i>	10
3.1	<i>Prikaz gibanja podvodnog vozila</i> [3]	12
3.2	<i>Satbilan položaj ROV-a</i> [3]	12
3.3	<i>Djelovanje balansirajućeg momenta</i> [3]	13
3.4	<i>Izraz za balansirajući moment</i> [3]	13
3.5	<i>Stabilnost u ovisnosti o duljini trupa i razmaku bočnih motora</i> [3]	14
3.6	<i>Moment valjanja</i> [3]	15
3.7	<i>Prikaz globalnog i lokalnog koordinatnog sustava</i> [4]	16
3.8	<i>Prikaz potisnih sila motora ROV-a</i> [3]	22
4.1	<i>Simulink model podvodnog vozila</i>	25
4.2	<i>Dinamički dio modela</i>	26
4.3	<i>Kinematički dio modela</i>	26
4.4	<i>Izranjanje s početnom brzinom u x i z osi</i>	27
4.5	<i>Zaranjanje s početnom brzinom u x i z osi</i>	28
4.6	<i>Uvjeti različitih početnih brzina pojedinih motora</i>	28

4.7	<i>Kružno izranjanje</i>	29
4.8	<i>Kružno gibanje u xy ravnini</i>	29
5.1	<i>Shema sustava upravljanja i regulacije motora ROV-a</i>	31
5.2	<i>Propulzor</i>	32
5.3	<i>Multiplex Royal digitalni servomotor [5]</i>	32
5.4	<i>Kamera GoPro HD Hero [6]</i>	33
5.5	<i>Analogna kamera</i>	33
5.6	<i>Akumulatorska baterija FIAMM FG20722 [7]</i>	34
5.7	<i>Rasvjetno tijelo</i>	34
5.8	<i>FT232RL integrirani krug [8]</i>	35
5.9	<i>Izgled tiskane pločice komunikacijskog modula (donja i gornja strana)</i>	36
5.10	<i>ATMEL ATmega8A mikrokontroler [9]</i>	37
5.11	<i>Izgled tiskane pločice modula s mikrokontrolerom (donja i gornja strana)</i>	38
5.12	<i>Senzor tlaka Motorola MPXM2202 [10]</i>	39
5.13	<i>ATMEL AVR MKII programator [11]</i>	39
5.14	<i>Driver za pogonske motore [12]</i>	40
5.15	<i>Izgled tiskane pločice modula s driver-ima (donja i gornja strana)</i>	40
5.16	<i>Osvjetljavanje tiskane pločice</i>	43
5.17	<i>Razvijanje tiskane pločice</i>	43
5.18	<i>Jetkanje tiskane pločice</i>	44
5.19	<i>Jetkanje tiskane pločice</i>	45
5.20	<i>Tehnika lemljenja [13]</i>	45
6.1	<i>Korisničko grafičko sučelje</i>	51
7.1	<i>Skica oštećenja šavne cijevi</i>	52
7.2	<i>Rezultati ispitivanja: mrak i svijetlo</i>	53
7.3	<i>Plan putanja ispitnih zadataka</i>	54
7.4	<i>Radna atmosfera za vrijeme ispitivanja</i>	54
7.5	<i>Antičko nalazište Trstenik u Kaštelanskom zaljevu - broj 5 [14]</i>	55
7.6	<i>Plan kretanja podvodnog vozila</i>	55
7.7	<i>Valovi prije samog zarona</i>	56
7.8	<i>Upravljanje podvodnim vozilom</i>	56
7.9	<i>Otklanjanje mulja s arheoloških ostataka [14]</i>	57

Popis tablica

2.1	Svojstva materijala izrade	5
3.1	<i>Definicija varijabli korištenih u matematičkom modelu</i>	11
4.1	Parametri simulacijskog modela	27
5.1	<i>Komponente komunikacijskog modula</i>	36
5.2	<i>Komponente modula s mikrokontrolerom</i>	38
5.3	<i>Komponente modula s driver-ima</i>	41
5.4	<i>Širina vodova s obzirom na dopuštenu struju [15]</i>	41

Popis oznaka i kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
u	Brzina uzduž x-osi lokalnog koordinatnog sustava,	m/s
v	Brzina uzduž y-osi lokalnog koordinatnog sustava,	m/s
w	Brzina uzduž z-osi lokalnog koordinatnog sustava,	m/s
x_e	Brzina uzduž x-osi globalnog koordinatnog sustava,	m/s
y_e	Brzina uzduž y-osi globalnog koordinatnog sustava,	m/s
z_e	Brzina uzduž z-osi globalnog koordinatnog sustava,	m/s
ϕ	Kut zakreta oko x-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad
θ	Kut zakreta oko y-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad
ψ	Kut zakreta oko z-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad
p	Kutna brzina oko x-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad/s
q	Kutna brzina oko y-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad/s
r	Kutna brzina oko z-osi lokalnog koordinatnog sustava,	rad/s
X	Sila u smjeru x-osi lokalnog koordinatnog sustava,	N
Y	Sila u smjeru y-osi lokalnog koordinatnog sustava,	N
Z	Sila u smjeru z-osi lokalnog koordinatnog sustava,	N
K	Moment oko x-osi lokalnog koordinatnog sustava,	Nm
M	Moment oko y-osi lokalnog koordinatnog sustava,	Nm
N	Moment oko z-osi lokalnog koordinatnog sustava,	Nm
d	Udaljenost između x-osi i motora,	m
B	Sila uzgona,	N
G	Težina,	N
m	Masa podvodnog vozila,	kg
g	Gravitacijska konstanta,	m/s ²
J_x	Moment inercije oko osi x,	kg/m ²
J_y	Moment inercije oko osi y,	kg/m ²
J_z	Moment inercije oko osi z,	kg/m ²
F_1 i F_2	potisne sile bočnih motora,	N
F_3	potisna sila vertikalnog motora,	N

Kratika	Opis
<i>ROV</i>	Remotely Operated Vehicle
<i>UTP</i>	Unshielded Twisted Pair
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation
<i>DC</i>	Direct Current
<i>SD</i>	Secure Digital
<i>TXD</i>	Transmission Data
<i>USB</i>	Universal Serial Bus
<i>USART</i>	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface
<i>SRAM</i>	Static Random Access Memory
<i>O</i>	Globalni (fiksni ili inercijski) koordinatni sustav vezan uz Zemlju
O_0	Lokalni (mobilni) koordinatni sustav vezan uz vozilo
ν	linearne i kutne brzine
η	pozicije i orijentacije vozila
τ	Sile i momenti
M	matrica inercije sa uključenom dodanom masom
M_{RB}	matrica inercije čvrstog tijela
M_A	matrica dodane inercije
$C(\nu)$	matrica Coriolisovih i centripetalnih sila sa uključenom dodanom masom
C_{RB}	matrica Coriolis i centripetalnih sila čvrstog tijela
C_A	matrice hidrodinamičkih Coriolis i centripetalnih sila
$D(\nu)$	matrica hidrodinamičkog prigušenja
$X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r$	linearni koeficijenti hidrodinamičkog prigušenja
$X_{u u} u , Y_{v v} v , Z_{w w} w ,$	
$K_{p p} p , M_{q q} q , N_{r r} r $	kvadratni koeficijenti hidrodinamičkog prigušenja
$g(\eta)$	vektor gravitacijskih sila i momenata
τ_E	vektor sila poremećaja (valovi, vjetar, morske struje...)
r_G	vektor težišta tijela

Sadržaj

Popis slika	I
Popis tablica	III
Popis oznaka i kratica	IV
Sadržaj	VI
1 Uvod	1
1.1 Kratka povijest	1
1.2 Primjena podvodnog vozila	3
2 Mehanička konstrukcija podvodnog vozila	4
2.1 Opći opis konstrukcije podvodnog vozila	4
2.2 Proračun maksimalne operativne dubine	5
2.2.1 Analiza kupole	7
2.2.2 Analiza trupa	8
3 Matematički model	11
3.1 Statika	12
3.2 Nelinearni matematički model	15
3.2.1 Kinematički model	15
3.2.2 Dinamički model	18
3.3 Linearizirani model	22
3.3.1 Kinematički model	22
3.3.2 Dinamički model	23
4 Simulacijski model	25
4.1 Simulink	25
4.2 Grafički prikaz rezultata simulacije	27

5	Elektronički upravljački sklop	31
5.1	Princip rada svih dijelova sustava upravljanja	31
5.1.1	Upravljanje pogonskim motorima (propulzorima) i servomotorom . . .	31
5.1.2	Snimanje visokokvalitetnih videozapisa	33
5.1.3	Kamera za upravljanje	33
5.1.4	Napajanje i osvjetljenje sustava	34
5.2	Projektiranje modula sustava upravljanja	35
5.2.1	Komunikacijski modul	35
5.2.2	Modul s mikrokontrolerom i senzorom tlaka	36
5.2.3	Modul s driver-ima	40
5.3	Izrada tiskanih pločica	41
5.3.1	Čišćenje bakrene površine	42
5.3.2	Nanošenje zaštitnog sloja - fotopostupak	42
5.3.3	Jetkanje pločica	43
5.3.4	Skidanje (čišćenje) maske sa tiskanih vodova	44
5.3.5	Bušenje provrta	44
5.3.6	Lemljenje	45
6	Korisničko grafičko sučelje	46
6.1	Opis bitnijih dijelova programskog koda	46
6.1.1	Definicija sučelja	46
6.1.2	Funkcija RD	47
6.1.3	Definicija inkrementa promjene dubine za joystick	47
6.1.4	Očitavanje podataka sa joystick-a i filtracija istog	48
6.1.5	Mijenjanje slika u ovisnosti o pomaku joystick-a	49
6.1.6	Prikaz video signala i trenutne dubine	50
6.1.7	Prikaz snage dvaju bočnih motora	50
6.2	Konačan izgled sučelja	51
7	Ispitivanja podvodnog vozila	52
7.1	Ispitivanje u vodi	52
7.2	Ispitivanje u moru	55
8	Zaključak	58

A	Programski kod u mikrokontroleru	59
B	Elektroničke sheme projektiranih sklopova	65
C	Sklopni crtež	68
	Zahvala	70
	Literatura	71
	Sažetak	73
	Summary	74
	Životopis	75
	Anđelo Živalj	75
	Marin Lukas	76

1 Uvod

1.1 Kratka povijest

ROV (Remotely operated vehicle) ili daljinski upravljano vozilo je "čudo od tehnike" koje kroči ovim planetom posljednjih 50-ak godina i to prije svega pod vodom [16]. Prvi primjerak ove tehnologije razvila je Britanska kraljevska ratna mornarica pedesetih godina dvadesetog stoljeća u svrhu vađenja zaostalih neiskorištenih torpeda i mina iz mora. Nazvali su ga *Cutlet*, a njime se upravljalo daljinski pomoću kabela (slika(1.1)). Nedugo nakon toga Ratna mornarica SAD-a odlučila je financirati sličan projekt pod nazivom *CURV - Cable-Controlled Underwater Recovery Vehicle* čiji je zadatak bio vratiti na površinu atomsku bombu koja je završila na dnu Sredozemnog mora nakon pada aviona bombardera B-52G 1966 [1].



Slika 1.1: *Cutlet*[1]

Međutim, razvojem tehnologije, pogotovo u posljednjem desetljeću, napredak i primjena tih vozila se skokovito proširila tako da se danas raspolaže sa čitavim spektrom podvodnih vozila, od mikro ROV-ova koji mogu obaviti preciznu video inspekciju, skupiti uzorke sa morskog dna ili izmjeriti kemijske ili biološke vrijednosti pa sve do velikih i snažnih radnih strojeva za mnoge podvodne radove u industriji. U Europi danas predvodi Norveška koja je, zbog rizičnih uvjeta na naftnim poljima u Sjevernom moru, odlučila da sve podvodne

radove, umjesto ljudi - ronioaca, obave podvodni strojevi. Danas se ROV-ovi dijele u tri ili četiri osnovne kategorije s obzirom na njihovu veličinu / težinu, pogonsku i radnu snagu te primjenu. Prve dvije grupe zauzimaju mikro i mini ROV koji imaju masu do 10 kg odnosno do 50 kg i sa njima može upravljati jedna osoba. Opremljeni su s jednom ili dvije kamere, rasvjetom, raznim sensorima, jednostavnom mehaničkom rukom - manipulatorom. U treću grupu spadaju kompaktni ROV-ovi, a njihova se masa kreće od 50 kg do 150 kg. Ovi imaju veću potisnu snagu, a također mogu nositi veću težinu ili različite alate te za njihovo spuštanje u vodu i upravljanje njima potrebna su barem dva iskusna ROV pilota kao i manja dizalica. Neki od upotrebljivih alata su sonar - podvodni radar, mehanička ruka ili škare za rezanje manjih kablova, rotacijske četke za podvodno čišćenje, uređaji za testiranje metala ili anoda i slično. U posljednju grupu spadaju radni ROV-ovi, koji su obično veći, s velikom potisnom i radnom snagom te velikim izborom različitih alata ili su građeni za specifičnu primjenu (npr. inspekciju podmorskih cjevovoda ili kablova, otkrivanje podvodnih mina, itd.) [16].



Slika 1.2: *Nautilusum*

Jedan model daljinski upravljano podvodno vozilo iz prve kategorije (mini ROV) razvio se i na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu i to u prostorijama *Udruge mehatroničara* - studentske udruge koja djeluje pri spomenutom fakultetu [17], a čiji je član i jedan od autora projekta prikazanog na slici (1.2) simboličnog naziva *NautilusUM*.

1.2 Primjena podvodnog vozila

ROV-ovi se danas upotrebljavaju tamo gdje ljudi ne mogu proći ili je to opasno ili iz ekonomskih i praktičnih razloga. Mali primjerci poput *Nautilusum*-a se mogu provući kroz cijevi, podvodne kanale, jame, potopljene olupine, tankove itd. i to na dubine preko 500 m. Mogu poslužiti tamo gdje postoji opasnost od zračenja (nuklearne centrale) ili u drugim, za ronioce opasnim okolnostima. Redovito se koriste kod postavljanja, održavanja i inspekcije podvodnih konstrukcija naftnih platformi, podmorskih cjevovoda i kablova, kao sigurnosna potpora ronionicima, kod znanstvenih, bioloških i arheoloških istraživanja, podvodnog snimanja, u ribogojstvu, za pomorsku carinsku inspekciju, u brodogradnji, za mapiranje morskog dna, kod traženja i spašavanja potopljenih stvari. [16]

2 Mehanička konstrukcija podvodnog vozila

2.1 Opći opis konstrukcije podvodnog vozila

Edukacijsko podvodno vozilo opisano u ovom radu slične je koncepcije kao i većina podvodnih vozila u ovoj klasi te se sastoji od polimernog trupa u obliku cijevi na koji su postavljeni propulzori, uzgonskog tijela i utega koji osigurava stabilnost. Trup se sastoji od polimerne (PMMA) cijevi debljine 5 mm na jednom kraju zatvorene okruglom pločom, a na drugom polimernom termoformiranom kupolom spojenom na prirubnicu. Spojevi cijevi i stražnje ploče te cijevi i prirubnice izvedeni su zavarom kako bi se pojednostavnilo rješavanje problema brtvljenja. Kupola je spojena na prirubnicu vijčanim spojem sa 20 vijaka od nehrđajućeg čelika kako bi se ostvario jednolik pritisak na cijelu površinu gumene brtve te time osiguralo potrebno brtvljenje. Kako bi tok sila kroz prirubnicu i kupolu bio čim povoljniji korištene su podložne pločice sa obje strane. Na stražnjoj ploči nalaze se uvodnice kojima je omogućeno brtvljenje na energetskim kablovima za napajanje motora te kablom za komunikaciju s površinom. Unutar trupa nalaze se akumulatorske baterije za napajanje upravljačka elektronika te kamera sa servomehanizmom za pomicanje. S donje strane na trup je pričvršćena cijevna konstrukcija na kojoj se nalazi olovni uteg za stabilizaciju. Zbog jednostavnosti obrade konstrukcija je izrađena od bakrenih cijevi a spojevi su izvedeni tvrdim lemljenjem. Propulzori za gibanje u horizontalnoj ravnini nalaze se na nosačima s lijeve i desne strane trupa. Nosači propulzora izrađeni su od konstrukcijske plastike POM (poliacetal) obradom odvajanjem te za trup pričvršćeni pravokutnom aluminijskom cijevi. Propulzori se na nosaču nalaze sa stražnje strane, a s prednje se nalaze svjetla za osvjetljavanje radnog prostora u tamnoj okolini. Kućišta svjetla također su izrađena od konstrukcijske plastike POM (poliacetal), a na nosač spajaju mjedenom šipkom koja je u kontaktu s okolnim medijem te time osigurava potrebno hlađenje svjetlećih dioda. Spojevi između nosača propulzora i trupa te trupa i nosive konstrukcije utega izvedeni su obujmicama od nehrđajućeg čelika kako bi se izbjeglo dodatno bušenje trupa. Propulzor za vertikalno gibanje pričvršćen je vijcima pomoću odgovarajuće prirubnice na temeljnu ploču unutar uzgonskog tijela na gornjem dijelu podvodnog vozila. Uzgonsko tijelo izrađeno je od kompozita epoksid-staklena vlakna uz

polistirensku jezgru koja osigurava potreban uzgon te zaštićeno poliuretanskim premazom žute boje kako bi bilo dobro vidljivo u vodi. Na vrhu uzgonskog tijela nalaze se dva okasta vijka M6 pomoću kojih je podvodno vozilo moguće spojiti sa nekim sistemom za spuštanje i podizanje u vodu. Detaljan sklopni crtež podvodnog vozila nalazi se u prilogu C.

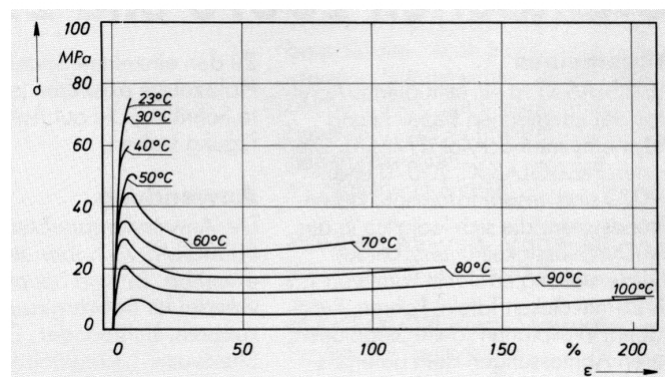
2.2 Proračun maksimalne operativne dubine

Kako bismo odredili maksimalnu operativnu dubinu podvodnog vozila potrebno je provesti analizu naprezanja i deformacija konstrukcije kućišta. Kako se kućište sastoji od dva dijela složene geometrije, kupole i cijevi zatvorene na jednom kraju, proračun je izvršen metodom konačnih elemenata korištenjem programskog paketa PLM Femap. Oba dijela kućišta diskretizirana su konačnim elementima za analizu ljuski (Nastran cquad4) [18] duljine brida 4 mm. Postupak diskretizacije detaljno je opisan u [19]. Svojstva materijala izrade, koji je u ovom slučaju polimetilmetakrilat (PMMA), preuzeta su iz [20] i prikazani u tablici (2.1).

Tablica 2.1: Svojstva materijala izrade

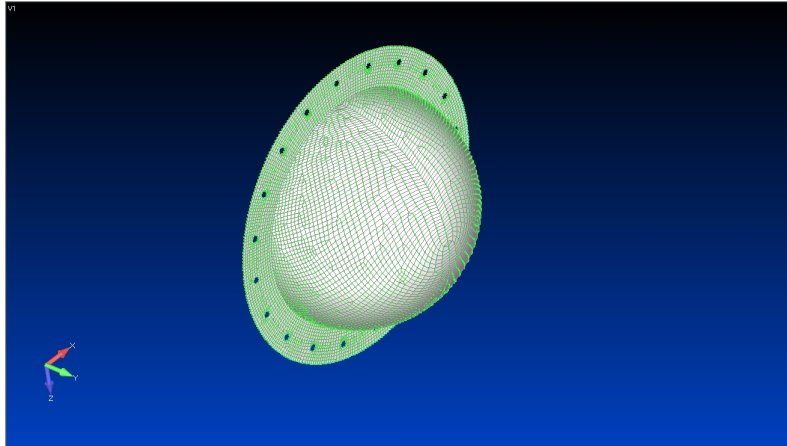
Modul elastičnosti N/mm ²	Modul smicanja N/mm ²	Poissonov koeficijent	Vlačna čvrstoća N/mm ²	Tlačna čvrstoća N/mm ²
3300	1700	0,37	80	110

Krivulja tečenja za PMMA u ovisnosti o temperaturi preuzeta je iz [2] i prikazana na slici (2.1):

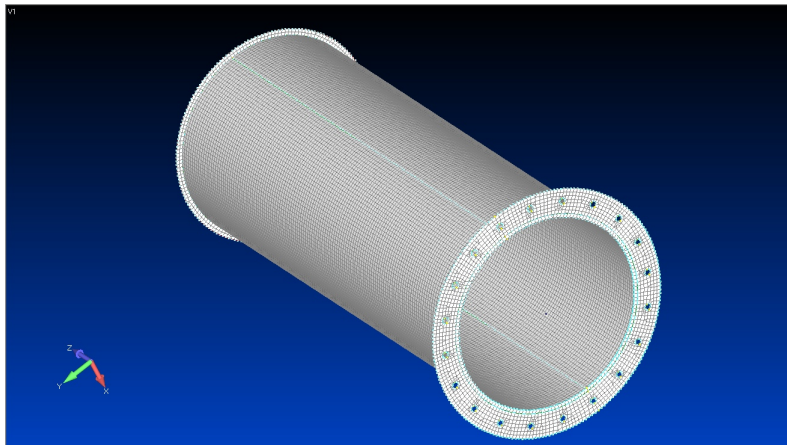


Slika 2.1: Krivulja tečenja za PMMA u ovisnosti o temperaturi [2]

Iz dijagrama možemo vidjeti da mehanička svojstva PMMA dosta ovise o temperaturi, no za naše radne uvjete u vodi opravdano je uzeti ponašanje materijala pri temperaturi od 23°C. Proračunski modeli sadrže 3346 elemenata za kupolu te 26561 element za trup te su prikazani na slikama (2.2) i (2.3).



Slika 2.2: *Proračunski model kupole*

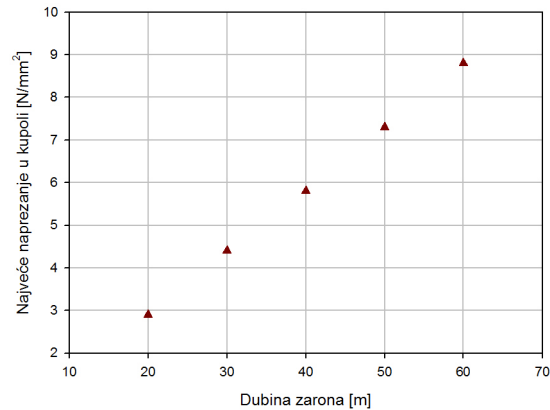


Slika 2.3: *Proračunski model trupa*

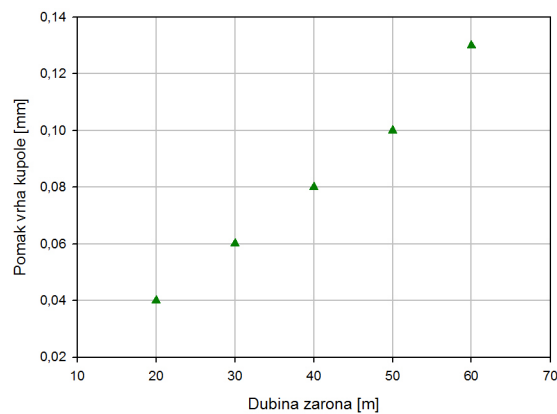
S obzirom da su dijelovi analizirani odvojeno kako bi se izbjeglo komplicirano modeliranje kontakta dvaju tijela, rubni uvjeti su izvedeni ručnom statičkom analizom konstrukcije. Dijelovi su ispitani na djelovanje vanjskog tlaka u ovisnosti o dubini zarona. Za svaki dio promatrano je maksimalno naprezanje te mjesto najvećeg progiba.

2.2.1 Analiza kupole

Analiza kupole provedena je opisanim postupkom te su praćene vrijednosti najvećeg naprezanja i maksimalnog progiba kupole prikazane u dijagramima na slikama (2.4) i (2.5).

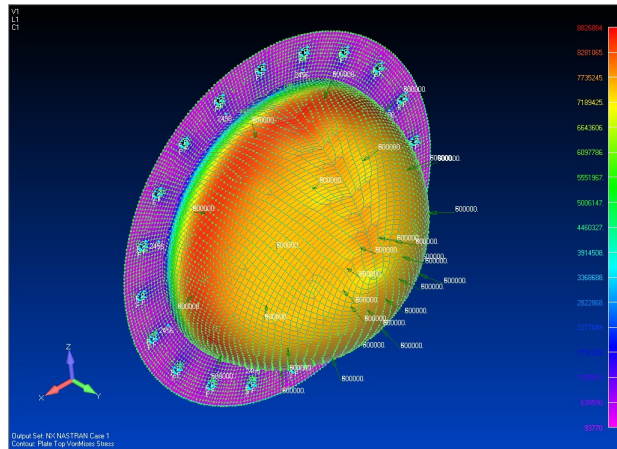


Slika 2.4: *Maksimalno naprezanje kupole*

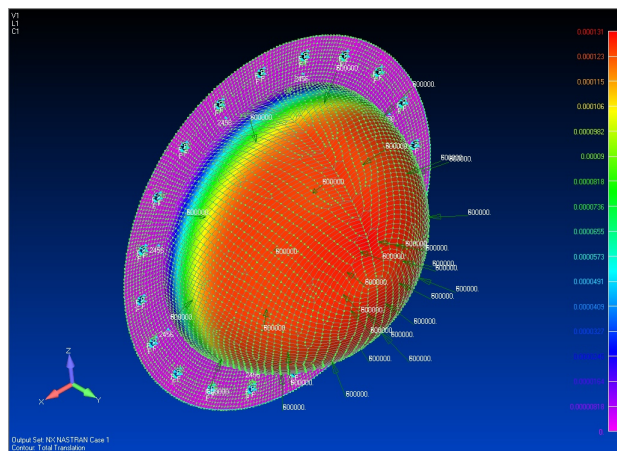


Slika 2.5: *Maksimalni progib kupole*

Iz dijagrama možemo zaključiti da naprezanje u kupoli te time i pomak vrha kupole rastu približno linearno s dubinom zarona. Kako čak ni pri dubini zarona od 60 m, što je maksimalna dopuštena dubina za brtvljenje prema standardu IP68 [21], naprezanje u kupoli ne prelazi vrijednost od 50 N/mm^2 što odgovara konvencionalnoj granici elastičnosti PMMA, analiza je zaustavljena. Slike (2.6) i (2.7) prikazuju raspodjele naprezanja i deformacija na kupoli pri dubini zarona 60 m.



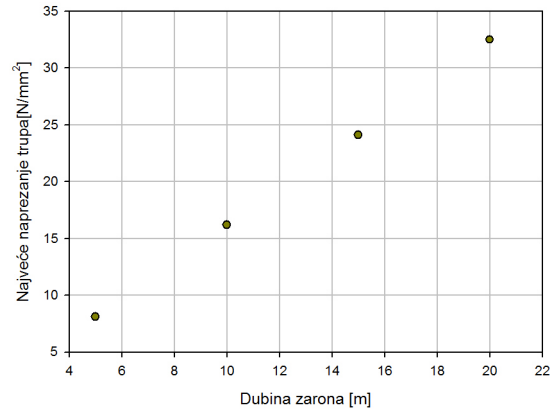
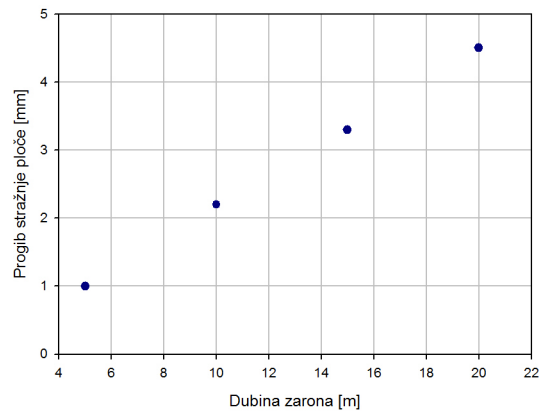
Slika 2.6: *Raspodjela napreznanja na kupoli pri dubini zarona 60 m*



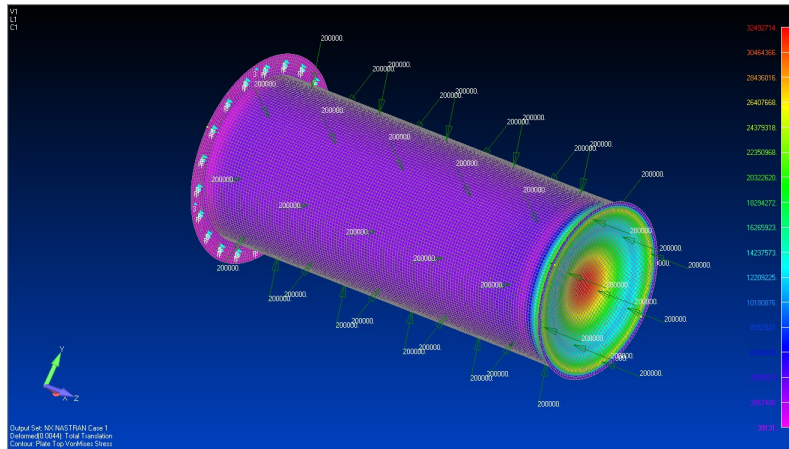
Slika 2.7: *Raspodjela deformacija kupole pri dubini zarona 60 m*

2.2.2 Analiza trupa

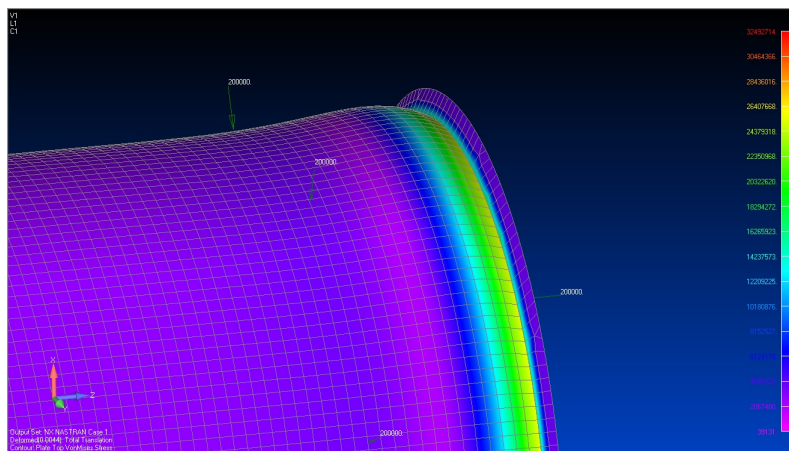
Trup podvodnog vozila također je analiziran opisanim postupkom te su praćene vrijednosti napreznanja i deformacija s obzirom na dubinu zarona. Analiza je pokazala da je najslabija točka trupa stražnja ploča u kojoj se javljaju najveća napreznanja. Isto tako primjećena je koncentracija napreznanja u zavarenom spoju između cijevi trupa i stražnje ploče. Slike (2.8) i (2.9) prikazuju ovisnost napreznanja i progiba stražnje ploče u ovisnosti o dubini zarona.

Slika 2.8: *Maksimalno naprezanje trupa*Slika 2.9: *Maksimalni progib trupa*

Iz dijagrama na slikama (2.8) i (2.9) vidimo da naprezanja u trupu rastu puno brže od naprezanja u kupoli te iz toga možemo zaključiti da je maksimalna operativna dubina određena čvrstoćom trupa. S obzirom da pri dubini zarona od 20 m najveće naprezanje u trupu dostiže vrijednost 32 N/mm^2 što je prema krivulji tečenja polovica konvencionalne granice elastičnosti određujemo da maksimalna operativna dubina opisanog podvodnog vozila iznosi 20 m uz faktor sigurnosti $S = 2$. Slika (2.10) prikazuje raspodjelu naprezanja na trupu ronilice pri dubini zarona od 20 m, a slika (2.11) pojavu koncentracije naprezanja na mjestu zavarenog spoja stražnje ploče i cijevi trupa.



Slika 2.10: *Raspodjela naprezanja na trupu*



Slika 2.11: *Koncentracija naprezanja na mjestu zavar*

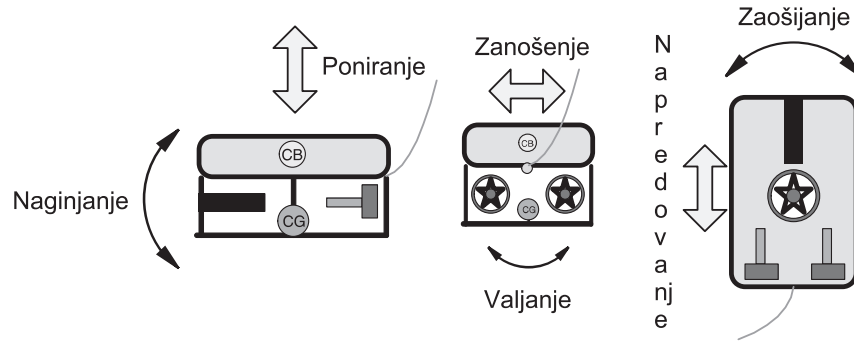
3 Matematički model

U ovom je poglavlju izveden matematički model podvodnog vozila s tri motora. Matematičkim modelom definirana su statička i dinamička svojstva plovila. Statička svojstva definiraju objekt u mirovanju i gibanju konstantnom brzinom, dok dinamička svojstva definiraju sile koje uzrokuju gibanje podvodnog vozila.

Tablica 3.1: *Definicija varijabli korištenih u matematičkom modelu*

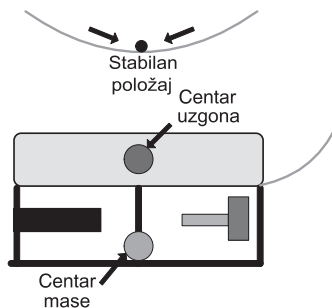
Stupanj slobode	Opis gibanja	Sile i momenti (τ)	Linearne i kutne brzine (v)	Pozicije i orijentacije (η)
1	Translacija u smjeru x osi (napredovanje)	X	u	x
2	Translacija u smjeru y osi (zanošenje)	Y	v	y
3	Translacija u smjeru z osi (poniranje)	Z	ω	z
4	Rotacija oko x osi (valjanje)	K	p	ϕ
5	Rotacija oko y osi (naginjanje)	M	q	θ
6	Rotacija oko z osi (zaošijanje)	N	r	ψ

Varijable koje se koriste pri definiranju matematičkog modela su: pozicije i orijentacije, linearne i kutne brzine, te sile i momenti. Model se razmatra u 6 stupnjeva slobode jer je potrebno 6 parametara za određivanje pozicije i orijentacije vozila. Navedene varijable su prikazane u tablici (3.1), te na slici (3.1).



Slika 3.1: Prikaz gibanja podvodnog vozila [3]

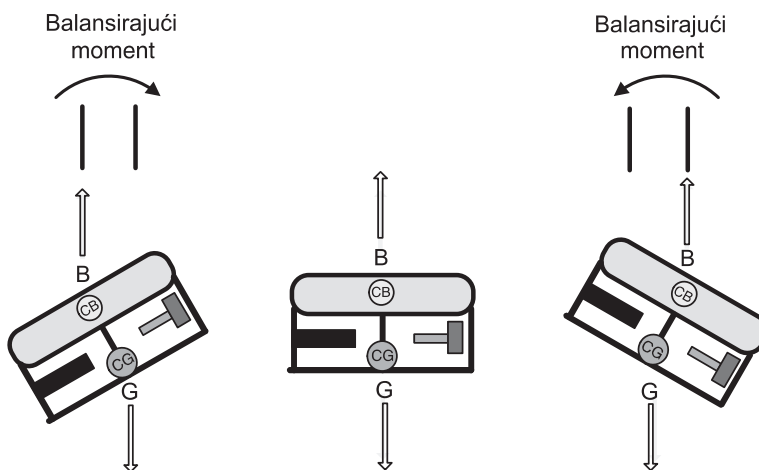
3.1 Statika



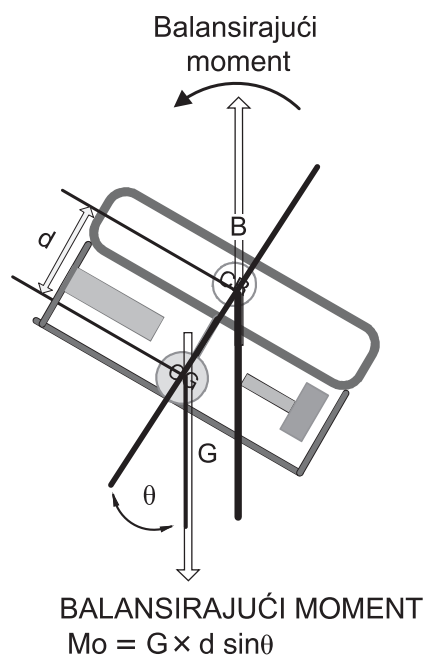
Slika 3.2: Stabilan položaj ROV-a [3]

Sva gibanja opisana u tablici (3.1) su moguća uslijed raznih vanjskih poremećaja, ali najčešće se aktivno ne upravlja svima, pa su tako, u ovom slučaju - ROV s tri motora, upravljiva sva gibanja osim valjanja i naginjanja, što može unijeti nestabilnosti u cijeli sustav. Da bi se te nestabilnosti izbjegle potrebno je osigurati svojstvo samostabiliziranja, a to se izvodi pravilnim rasporedom mase duž cijelog modela ROV-a tako da ima neutralan uzgon, tj. da uronjen u vodu "lebdi". Pravilnim odabirom materijala koji pruža uzgon i balansne mase ROV-a sila uzgona i gravitacijska sila koje djeluju na ROV se poništavaju. Kada se govori o stabilnosti plovnih objekata najbolja situacija je kad se centar mase nađe točno ispod centra uzgona kao na slici (3.2). U svrhu boljeg razumijevanja objasniti će se pojmovi centar uzgona i centar mase. Hidrostatski uzgon je sila koja djeluje na sva tijela uronjena u fluide (tekućine i plinove), a nastaje uslijed razlike hidrostatskih tlakova koji djeluju na gornji i donji dio tijela pa je centar sile uzgona točka središnjica volumena vode koji je

uronjeni objekt istisnuo, u ovom slučaju ROV. S druge strane, centar mase je točka iz koje se uzima da gravitacijska sila djeluje na objekt. Naime, da bi ROV-ovi bili što stabilniji, najčešće se izvode tako da centar mase bude što niže, a centar uzgona što više, jer što je veća ta udaljenost, u slučaju odstupanja ROV-a od ravnotežnog položaja uslijed djelovanja bilo kakvih vanjskih poremećaja, vraćanje u ravnotežni položaj bit će brže, ali i pružat će veći otpor pomicanju iz tog ravnotežnog položaja.

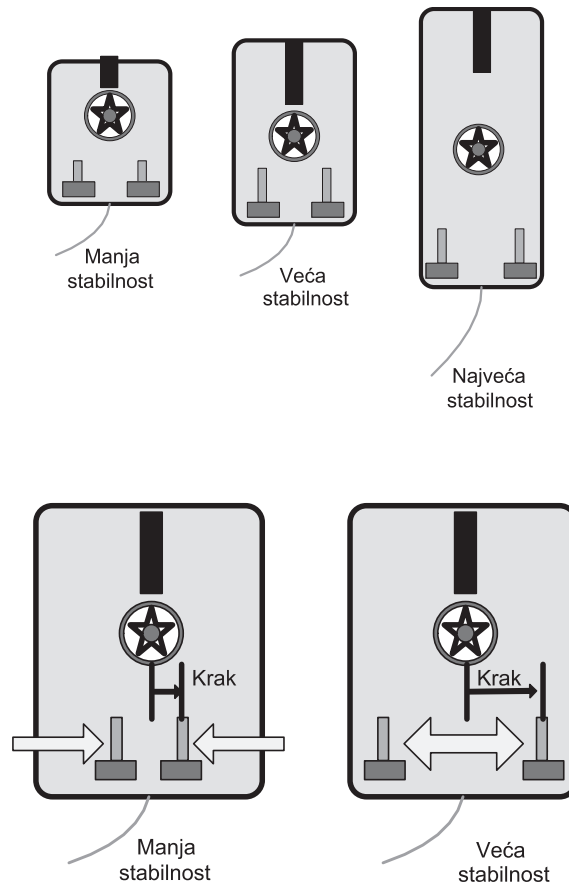


Slika 3.3: Djelovanje balansirajućeg momenta [3]



Slika 3.4: Izraz za balansirajući moment [3]

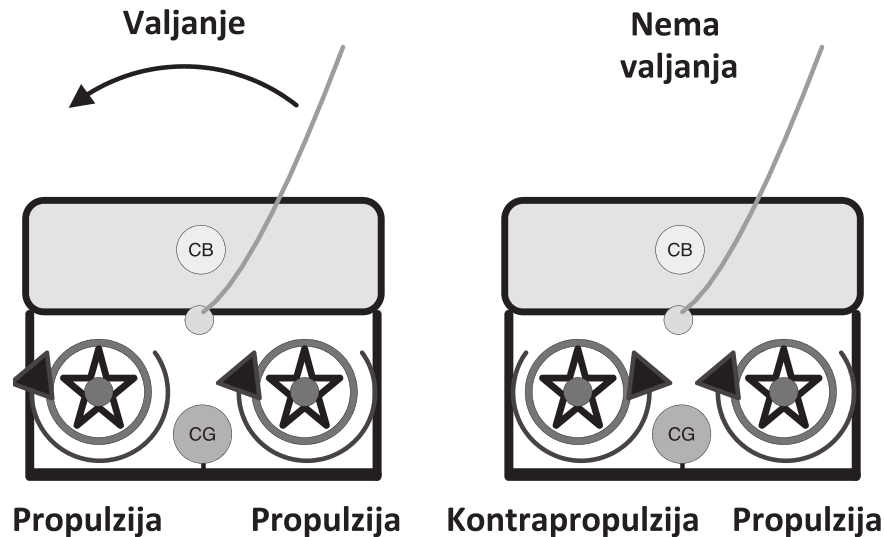
Drugim riječima, sila uzgona i gravitacijska sila - težina stvaraju spreg sila, tj. balansirajući moment (3.3) koji na bilo kakav poremećaj (naginjanje i valjanje) odgovara tako da nastoji vratiti ROV u ravnotežni položaj. Taj balansirajući moment se može i izraziti pomoću formule kao što je to prikazano na slici (3.4). Dakle, ako se jednadžba ravnoteže momenata postavi oko centra uzgona dobije se izraz kao na slici (3.4), pa je logično da će taj moment biti veći što je veći krak na kojem isti djeluje - krak d . Također je, za stabilnost, jako važna duljina trupa te razmak između bočnih motora što je prikazano i na slici (3.5).



Slika 3.5: *Stabilnost u ovisnosti o duljini trupa i razmaku bočnih motora [3]*

Svaki motor proizvodi potisnu silu i moment u centru rotacije te silu otpora u suprotnom smjeru od kretanja vozila (slika (3.6)). Ako se oba motora vrte istom kutnom brzinom u istom smjeru javlja se moment valjanja oko aksijalne osi što svakako treba izbjeći jer to unosi odstupanje od željenog pravca kretanja prilikom manevriranja kroz medij (vodu). To se izbjegava na način da se elise motora postave međusobno obrnuto kao i smjer vrtnje što

u konačnici ukupan moment oko aksijalne osi vozila kao i kutnu akceleraciju izjednačava s nulom pri istoj kutnoj brzini obaju motora. Iz prethodnoga proizlazi zaključak da je manevriranje moguće izvesti kontroliranom promjenom kutne brzine bočnih motora [3].

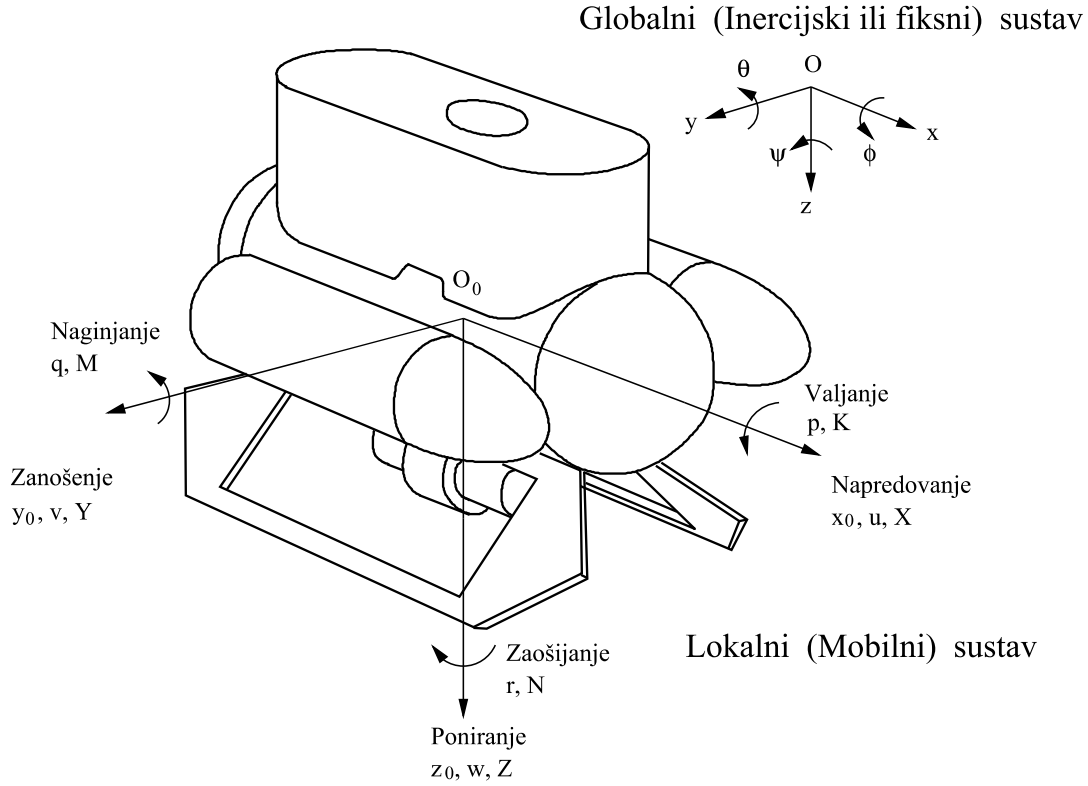


Slika 3.6: Moment valjanja [3]

3.2 Nelinearni matematički model

3.2.1 Kinematički model

Analiza gibanja ROV-a sa 6 stupnjeva slobode omogućena je definiranjem mobilnog i fiksnog koordinatnog sustava. Mobilni (lokalni) koordinatni sustav O_0 vezan je uz vozilo tako da je njegovo ishodište najčešće smješteno u točki težišta tijela, dok je globalni (fiksni ili inercijski) koordinatni sustav O vezan uz Zemlju. Koordinatne osi se međusobno poklapaju te su odabrane prema pravilu desne ruke. Fiksni koordinatni sustav se koristi za definiranje pozicije i orijentacije vozila (η), dok se mobilni koordinatni sustav koristi za izražavanje linearnih i kutnih brzina (ν). Gibanje ROV-a u potpunosti može biti opisano pomoću vektora η , ν i τ , gdje τ predstavlja vektor sila i momenata koji uzrokuju gibanje istog, a definirani su u mobilnom koordinatnom sustavu.



Slika 3.7: Prikaz globalnog i lokalnog koordinatnog sustava [4]

Na slici (3.7) su prikazani vektori opisa gibanja:

- u fiksnom koordinatnom sustavu O
 $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T$, gdje su $\boldsymbol{\eta}_1 = [x, y, z]^T$ pozicije, a $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ orijentacije,
- u mobilnom koordinatnom sustavu O_0
 $\boldsymbol{\nu} = [\boldsymbol{\nu}_1^T, \boldsymbol{\nu}_2^T]^T$, gdje su $\boldsymbol{\nu}_1 = [u, v, w]^T$ linearne, a $\boldsymbol{\nu}_2 = [p, q, r]^T$ kutne brzine,
 $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^T, \boldsymbol{\tau}_2^T]^T$, gdje su $\boldsymbol{\tau}_1 = [X, Y, Z]^T$ sile, a $\boldsymbol{\tau}_2 = [K, M, N]^T$ momenti.

Kinematički model povezuje brzine u mobilnom koordinatnom sustavu ($\boldsymbol{\nu}$) i brzine ($\dot{\boldsymbol{\eta}}$) u fiksnom koordinatnom sustavu [4]. Model opisuje sljedeća jednadžba:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \quad , \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_1 \\ \boldsymbol{\nu}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Matrice transformacija za osi x , y i z glase:

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$\mathbf{J}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{J}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

pa je submatrica transformacija $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$:

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{J}_x \mathbf{J}_y \mathbf{J}_z, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Kutne brzine računaju se pomoću Eulerove transformacijske matrice $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{J}_x \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{J}_x \mathbf{J}_y \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \phi \\ \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi + \dot{\theta} \cos \phi \\ \dot{\psi} \cos \theta \cos \phi - \dot{\theta} \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Iz izraza iznad se dobije:

$$\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.2 Dinamički model

Dinamički model povezuje sile koje djeluju na podvodno vozilo ($\boldsymbol{\tau}$) i brzine gibanja vozila ($\boldsymbol{\nu}$) [4]. Podvodno vozilo sa 6 stupnjeva slobode se može opisati nelinearnom dinamičkom jednačinom:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E \quad , \quad (3.12)$$

gdje je:

- \mathbf{M} - matrica inercije s uključenom dodanom masom ,
- $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})$ - matrica Coriolisovih i centripetalnih sila s uključenom dodanom masom ,
- $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ - matrica hidrodinamičkog prigušenja ,
- $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ - vektor gravitacijskih sila i momenata ,
- $\boldsymbol{\tau}$ - vektor sila (uzrokovanih propulzijom motora) i momenata ,
- $\boldsymbol{\tau}_E$ - vektor sila poremećaja (valovi, vjetar, morske struje...) .

Matrica inercije

Matrica inercije \mathbf{M} sastoji se od sume matrice inercije čvrstog tijela (\mathbf{M}_{RB}) i matrice dodane inercije (\mathbf{M}_A): $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$. Dodana inercija predstavlja tlačne sile i momente koji su nastali kao posljedica prisilnog harmoničkog gibanja vozila, a proporcionalni su akceleraciji samog tijela podvodnog vozila [4].

\mathbf{M}_{RB} je oblika:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G) & \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & -mz_G & my_G \\ 0 & m & 0 & mz_G & 0 & -mx_G \\ 0 & 0 & m & -my_G & mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad , \quad (3.13)$$

gdje su m masa vozila, $\mathbf{r}_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ vektor težišta tijela, $\mathbf{I}_{x\dots z}$ momenti inercije, $\mathbf{I}_{xy,yz,zx}$ produkti inercije, $\mathbf{I}_{3\times 3}$ matrica identiteta i $\mathbf{S}(\mathbf{r}_G)$ asimetrična matrica oblika:

$$\mathbf{S}(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix} . \quad (3.14)$$

Pod pretpostavkom idealnog strujanja fluida te male brzine ROV-a, matrica dodane inercije je definirana kao dijagonalna:

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} , \quad (3.15)$$

gdje su elementi oblika $X - \dot{u}$ koeficijenti uz derivaciju brzine koja je zapisana u indeksu. Primjerice, hidrodinamička dodana masa sile Y_A uzduž y -osi prema akceleraciji \dot{u} u smjeru osi x se zapisuje kao $Y_A = Y_{\dot{u}}\dot{u}$, gdje je $Y_{\dot{u}} = \frac{\delta Y_A}{\delta \dot{u}}$.

Nedijagonalne elemente matrice inercija moguće je izbjeći ukoliko se mobilni koordinatni sustav smjesti u težište tijela ROV-a pa će tada vektor \mathbf{r}_G biti $[x_G, y_G, z_G]^T = 0$. Ukoliko se osi poklapaju sa osima inercije, tenzor inercije \mathbf{I}_0 će biti dijagonalan. Tada je konačni oblik matrice inercije:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} . \quad (3.16)$$

Matrica Coriolisovih i centripetalnih izraza

Matrica Coriolis i centripetalnih izraza sastoji se od sume matrica Coriolis i centripetalnih sila čvrstog tijela \mathbf{C}_{RB} , te matrice dodane mase, odnosno matrice hidrodinamičkih Coriolis i centripetalnih sila \mathbf{C}_A .

\mathbf{C}_{RB} glasi:

$$\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{12}(\boldsymbol{\nu}) \\ -\mathbf{C}_{12}^T(\boldsymbol{\nu}) & \mathbf{C}_{22}(\boldsymbol{\nu}) \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\mathbf{C}_{12}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$\mathbf{C}_{22}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

dok je \mathbf{C}_A oblika:

$$\mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Koristeći identične uvjete kao i za dobivanje konačnog oblika matrice inercije slijedi:

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) + \mathbf{C}_A(\boldsymbol{\nu}) \quad , \quad (3.21)$$

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & (m - Z_{\dot{w}})w & -(m - Y_{\dot{v}})v \\ 0 & 0 & 0 & -(m - Z_{\dot{w}})w & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ 0 & 0 & 0 & (m - Y_{\dot{v}})v & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \\ 0 & (m - Z_{\dot{w}})w & -(m - Y_{\dot{v}})v & 0 & (I_z - N_{\dot{r}})r & -(I_y - M_{\dot{q}})q \\ -(m - Z_{\dot{w}})w & 0 & (m - X_{\dot{u}})u & -(I_z - N_{\dot{r}})r & 0 & (I_x - K_{\dot{p}})p \\ (m - Y_{\dot{v}})v & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 & (I_y - M_{\dot{q}})q & -(I_x - K_{\dot{p}})p & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Matrica hidrodinamičkog prigušenja

Matrica hidrodinamičkog prigušenja definirana za čvrsto tijelo koje se giba kroz fluid je realna, asimetrična i pozitivna. Uzroci hidrodinamičkog prigušenja su potencijalno prigušenje zbog prisilnih oscilacija tijela, trenje površinskog sloja vozila, valovi kod plovnih vozila i sila uzrokovana oscilatornim protokom. Prigušenje podvodnog vozila koje se giba

velikom brzinom je nelinearno. Ukoliko se pretpostavi mala brzina gibanja i idealno strujanje fluida uz zanemarenje prigušenja reda višeg od drugog, matrica hidrodinamičkog prigušenja postaje dijagonalna sa linearnim i kvadratnim članovima [4]. Njezin oblik je:

$$D(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Vektor gravitacijskih sila i momenata

Vektor gravitacijskih sila i momenata čine sila gravitacije i sila uzgona. Ako je m masa vozila, G sila gravitacije i B sila uzgona, transformirane sile u mobilni koordinatni sustav iznose:

$$\mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}_2) = -\mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Tada je vektor gravitacijskih sila i momenata definiran na sljedeći način:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{r}_G \times \mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{r}_B \times \mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Ukoliko su iznosi sila B i G jednaki te uz poklapanje točaka težišta tijela i centra uzgona, vidi se da je iznos vektora jednak 0.

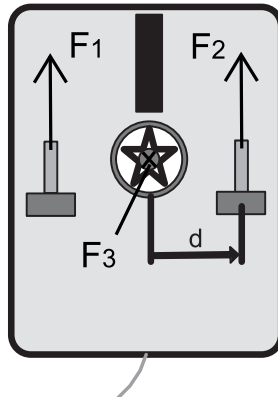
Vektor sila (uzrokovanih propulzijom motora) i momenata

Ovaj ROV model ima tri motora (dva bočna i jedan vertikalni) što je prikazano slikom (3.2.2) te su oni definirani jednadžbom:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

gdje su F_1 , F_2 i F_3 potisne sile triju motora, k karakteristika istih, a u_1 , u_2 i u_3 su naponski signali koji pobuđuju motore [22]. Pomoću ovih sila i kraka d kao što je to prikazano na slici (3.2.2) se definira vektor τ :

$$\tau = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 \\ 0 \\ F_3 \\ 0 \\ 0 \\ (F_1 - F_2)d \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$



Slika 3.8: Prikaz potisnih sila motora ROV-a [3]

3.3 Linearizirani model

3.3.1 Kinematički model

Cjelokupan matematički model plovila je nelinearan. Sa ciljem jednostavnijeg modela pri nižim brzinama, potrebno je postojeći linearizirati. Jedno od pojednostavljenja je smanjenje stupnjeva slobode sa 6 na 4. Na temelju pretpostavke stabilnosti podvodnog vozila u valjanju ($\phi = 0$) i naginjanju ($\theta = 0$) dobija se linearizirani (pojednostavljeni) model [23]. Kinematički

model tada se po izrazu (2.1) svodi na:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

3.3.2 Dinamički model

Uz pretpostavku da se vozilo giba malom brzinom moguće je izostaviti matrice dodanih inercija te matricu dodanih hidrodinamičkih Coriolisovih i centripetalnih sila (\mathbf{M}_A i \mathbf{C}_A) jer te matrice ovise o akceleraciji samog ROV-a, a budući da se radi o modelu pri nižim brzinama, vrijednosti tih matrica se mogu zanemariti jer će biti jako male ili približno jednake 0. Zatim, smještanjem mobilnog koordinatnog sustava u težište tijela $\mathbf{r}_G = 0$, što je moguće učiniti kod malih podvodnih vozila, matrica inercije postaje dijagonalna. Vektor gravitacijskih sila i momenata je također jednak 0 jer se težina i uzgon poništavaju. I na kraju, vektor sila poremećaja se može zanemariti jer je riječ o idealnim uvjetima (nema turbulencija, idealno strujanje fluida...) [23]. Kad se sve to uzme u obzir i uvrsti u izraz (3.12) dobije se sljedeće:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -mv \\ 0 & 0 & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ mv & -mu & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ N \end{bmatrix}$$

Raspis lineariziranog matematičkog modela u obliku prostora stanja

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (3.31)$$

\mathbf{x} - vektor stanja

$\dot{\mathbf{x}}$ - vektor derivacija varijabli stanja

\mathbf{u} - vektor ulaza

\mathbf{y} - vektor izlaza

\mathbf{A} - matrica koeficijenata sustava

\mathbf{B} - matrica ulaza sustava

\mathbf{C} - matrica izlaza sustava

\mathbf{D} - matrica direktnog preslikavanja ulaza na izlaz

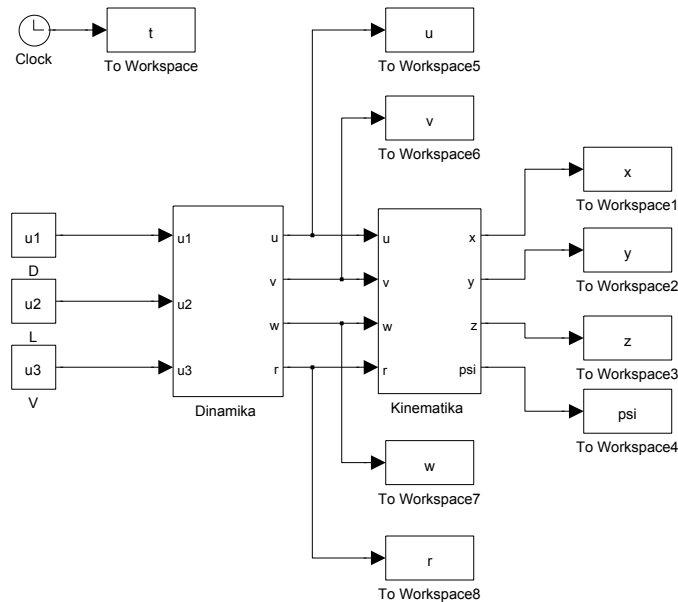
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{X_u + X_{u|u}|u|}{m} & 0 & 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Y_v + Y_{v|v}|v|}{m} & 0 & 0 & -u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Z_w + Z_{w|w}|w|}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{N_r + N_{r|r}|r|}{I_z} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{k}{m} & \frac{k}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k}{m} \\ \frac{k \cdot d}{I_z} & -\frac{k \cdot d}{I_z} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

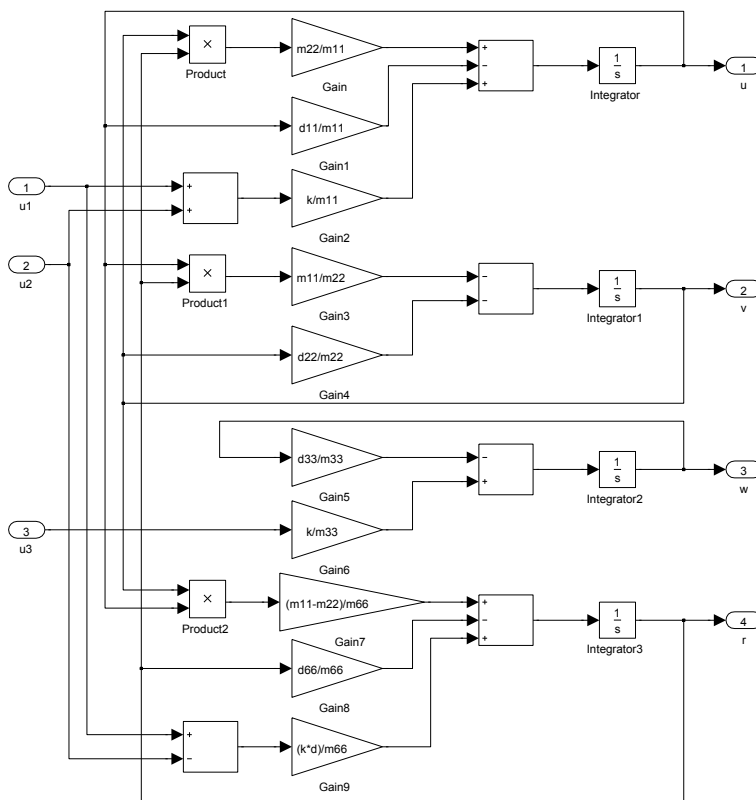
4 Simulacijski model

4.1 Simulink

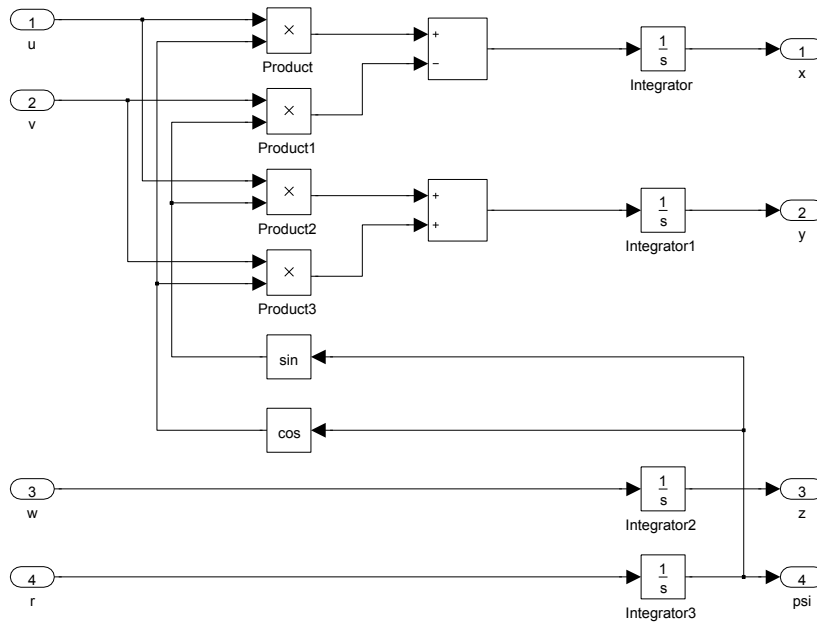
Jednadžbe dobivene izvodom potrebno je modelirati u *Matlab-ovom* alatu za simuliranje i izradu modela - *Simulink*, kako bi se dobio što bolji uvid u dinamiku sustava. Sam model (4.1) se sastoji od dva glavna dijela (*submodela*): dinamike (4.2) i kinematike (4.3). Na prvi su spojeni ulazi koji predstavljaju pogonske motore čijim se prepodešavanjem vrši upravljanje podvodnog vozila.



Slika 4.1: *Simulink model podvodnog vozila*



Slika 4.2: *Dinamički dio modela*



Slika 4.3: *Kinematički dio modela*

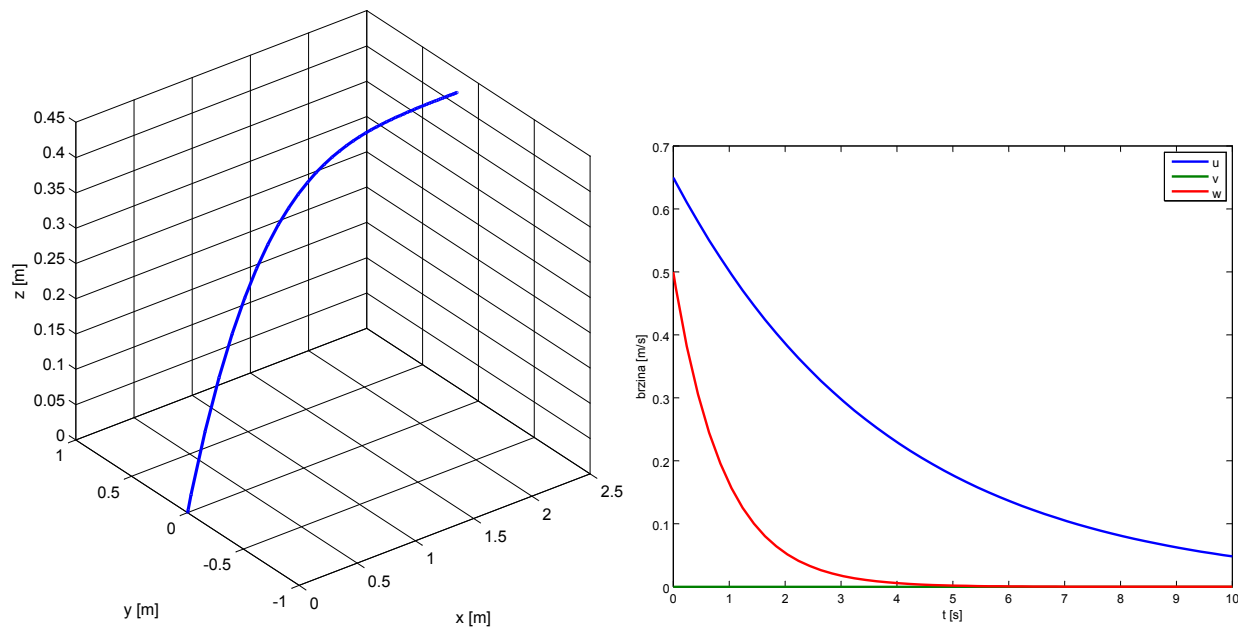
Parametri modela (4.1) motora odabrani su prema vrijednostima stvarnih kupljenih motora.

Tablica 4.1: Parametri simulacijskog modela

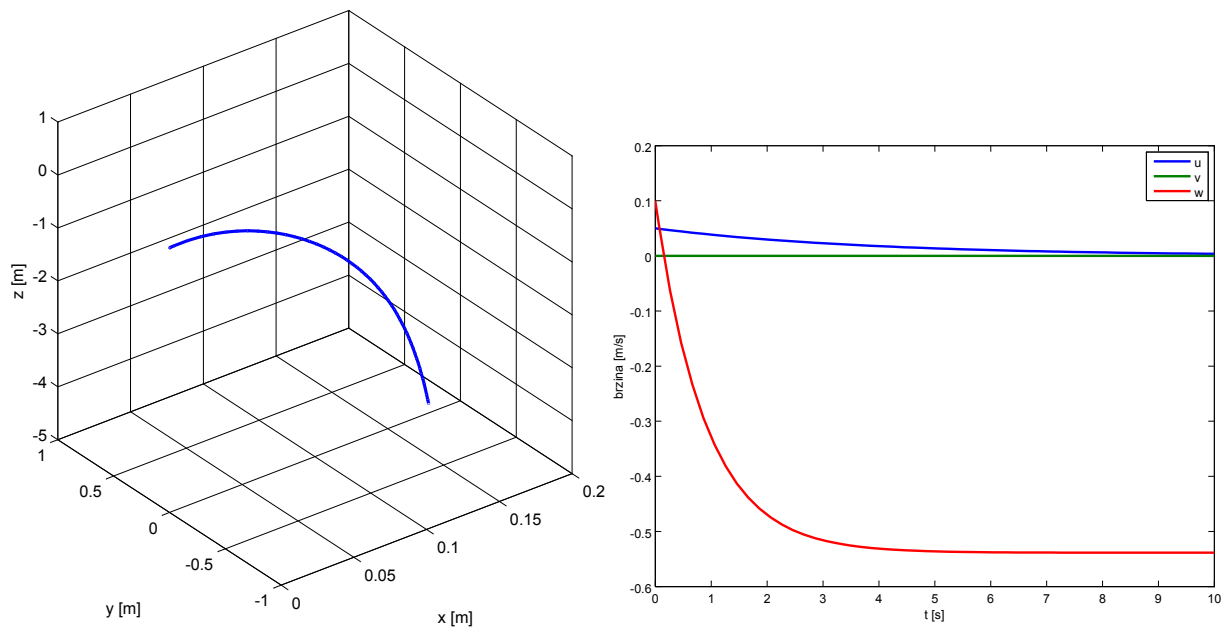
FIZIKALNA VELIČINA	VRIJEDNOST
ukupna masa podvodnog vozila - m [kg]	5
koeficijent potiska - k	3
krak na kojem motor djeluje potisnom silom - d [m]	0.2
moment inercije oko osi z - I_z [kg/m ²]	0.0253

4.2 Grafički prikaz rezultata simulacije

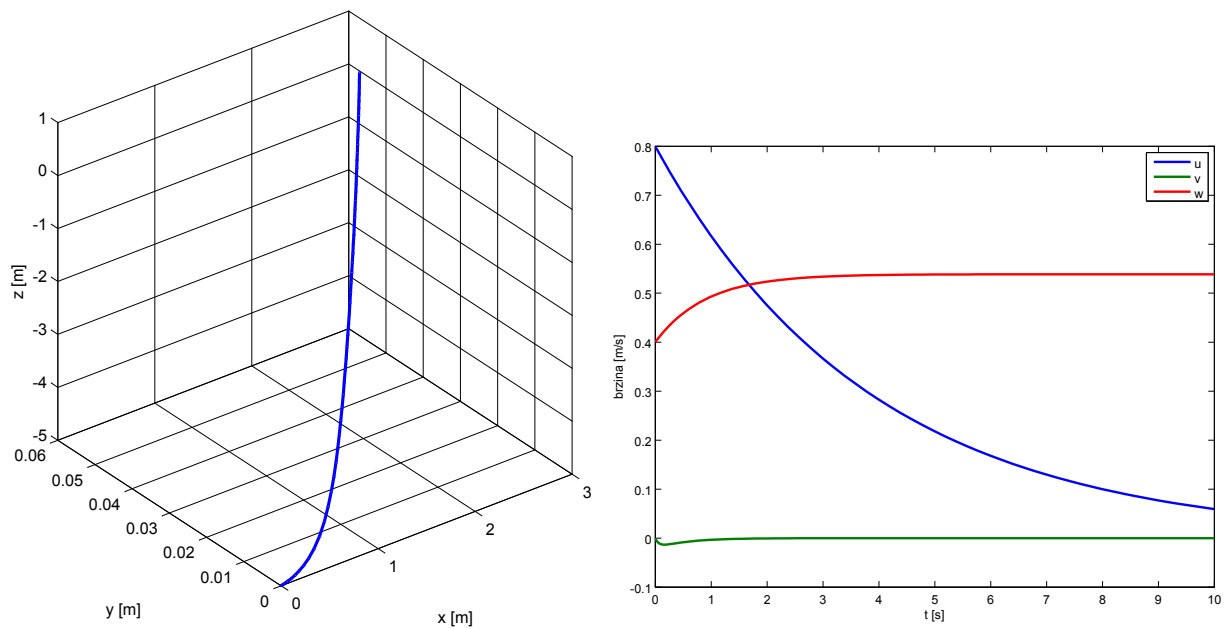
Sljedeće slike prikazuju ponašanje podvodnog vozila u različitim uvjetima rada bez upotrebe ikakvih regulacijskih algoritama već samo prepodešavanjem odgovarajućih parametara - imitacija pilota. Svaka od slika sastoji se od dva dijela. Lijevi dio prikazuje putanju vozila dok desni grafički prikazuje linearne brzine u svim osima.



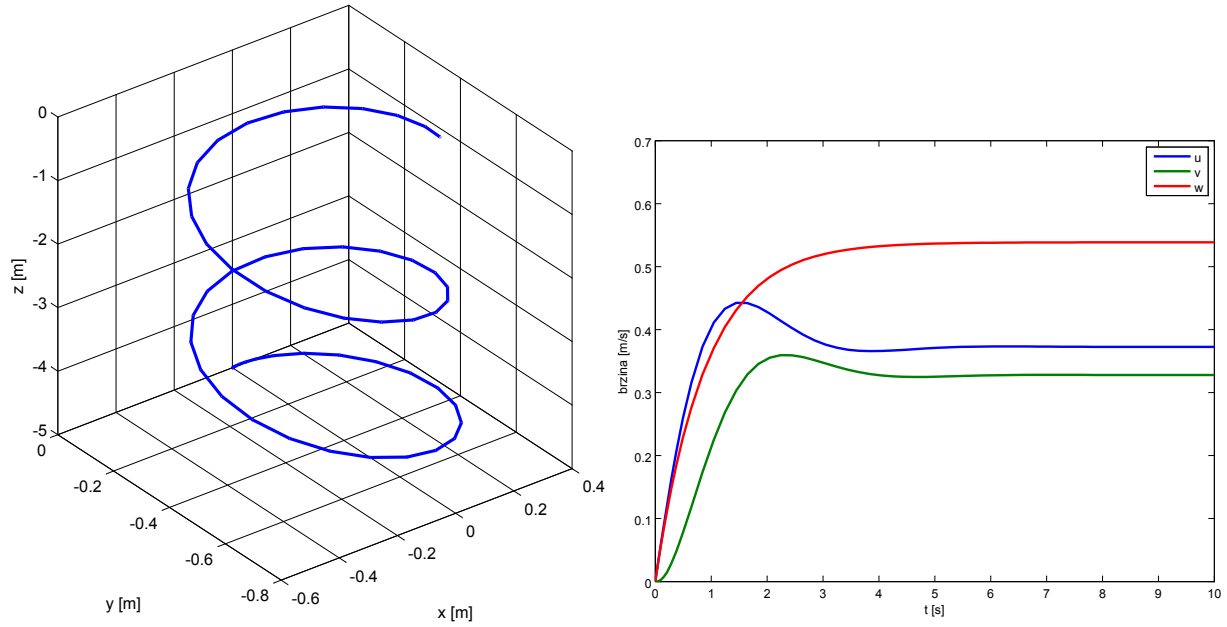
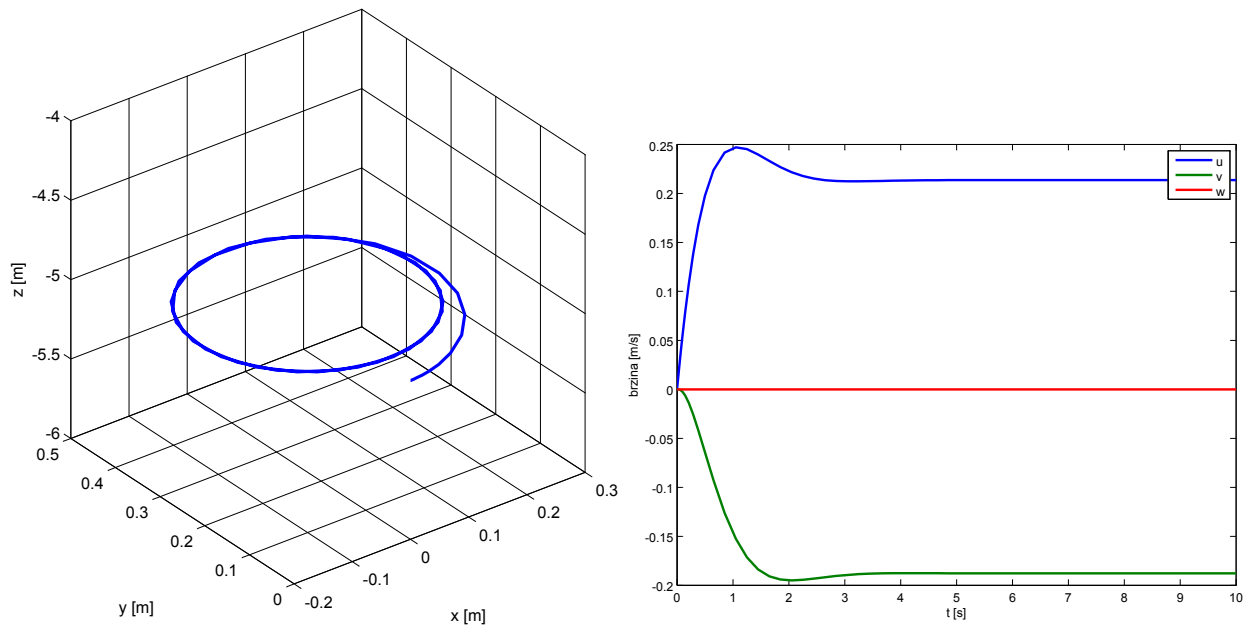
Slika 4.4: Izranjanje s početnom brzinom u x i z osi



Slika 4.5: Zaranjanje s početnom brzinom u x i z osi



Slika 4.6: Uvjeti različitih početnih brzina pojedinih motora

Slika 4.7: *Kružno izranjanje*Slika 4.8: *Kružno gibanje u xy ravnini*

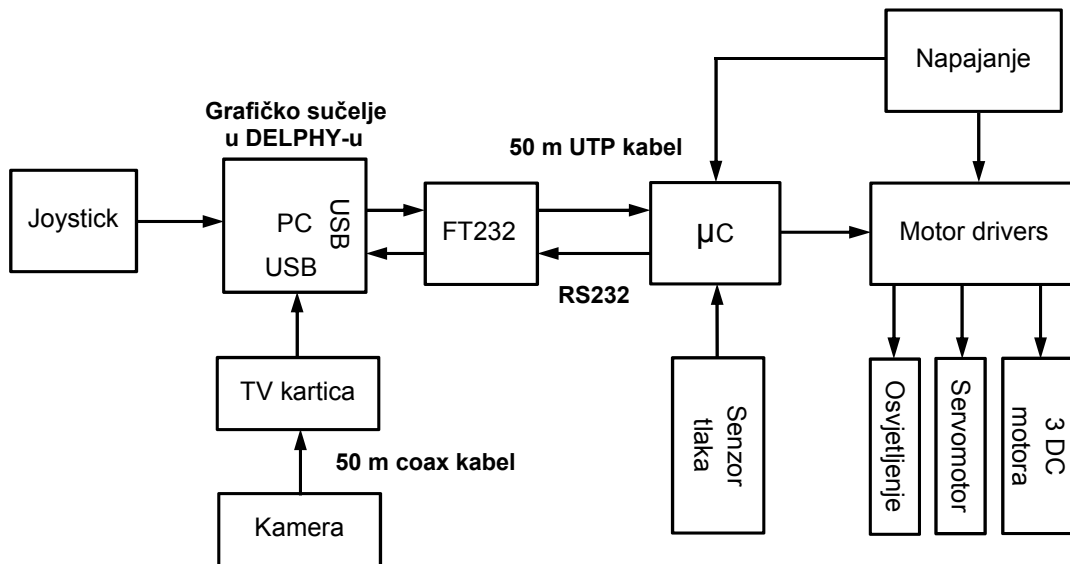
Iz prethodnih grafova se vidi da je iznos brzine u osi x gotovo dva puta veći od iznosa iste u osi z, što je i logično s obzirom na to da su u osi x postavljena dva, a u osi z jedan motor. Ali, to ukazuje da je možda bilo bolje postaviti vertikalni motor veće snage od

bočnih jer bi se time uravnotežio prostorni manevar kroz medij, tj. izbjegla bi se situacija da pilot mora duže držati vertikalni motor u stanju pobude od bočnih motora kako bi postigao ravnomjerno kretanje kroz prostor. Uglavnom, simulacije su pokazale da je, uz parametre koji odgovaraju stvarnim vrijednostima testiranog vozila, dobivena povratna informacija jako korisna. No, ona se ipak ne može uzeti kao apsolutno mjerilo vrijednosti pojedinih algoritama, budući da je preciznost ponašanja modela podložna pogreškama u vrijednosti varijabli koje se programskoj podršci predaju putem odgovarajućih konfiguracijskih datoteka, bilo da je do tih pogrešaka došlo ljudskom pogreškom ili pak iz nedovoljnog poznavanja samog predmeta modeliranja.

5 Elektronički upravljački sklop

5.1 Princip rada svih dijelova sustava upravljanja

Najlakši način za objasniti sustav upravljanja i regulacije jest korištenjem jednostavne sheme koja je prikazana na slici (5.1).



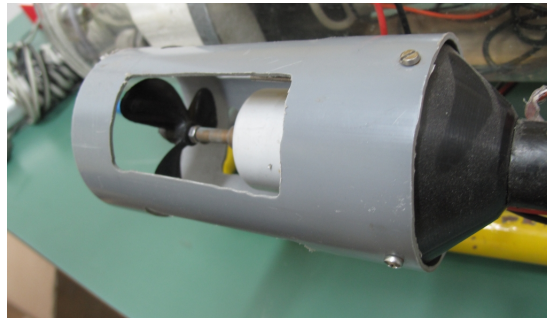
Slika 5.1: Shema sustava upravljanja i regulacije motora ROV-a

Prikazanim sustavom omogućeno je upravljanje motorima, osvjetljenje, upravljanje servomotorom te prikupljanje podataka sa senzora tlaka. Najprije će se definirati princip rada sustava, a zatim će se opisati i sastavni dijelovi.

5.1.1 Upravljanje pogonskim motorima (propulzorima) i servomotorom

S joystick-a, koji je spojen preko USB ulaza na osobno računalo (PC), pošalje se podatak željenog smjera i brzine kretanja ROV-a. Zatim se taj podatak prosljeđuje dalje preko modula za komunikaciju pa preko serijske veze (50 m UTP kabela) do mikrokontrolera (μC), koji ga obrađuje te na temelju dobivenog podatka šalje PWM signal

prema driverima za motore koji pokreću motore koje je potrebno pokrenuti da bi se izvršilo zadano kretanje. Ovaj ROV model je pogonjen sa tri 12 V DC motora (5.2) maksimalne snage 20 W, dimenzija 115 mm dužine, promjera 60 mm, te mase 0.4 kg. Glavni dio propulzora opisanog podvodnog vozila je standardna kaljužna brodska pumpa. Kaljužna pumpa odabrana je zbog dobrog brtvljenja na vratilu, snažnog istosmjernog elektromotora, otpornog kućišta te vrlo dobrog brtvljenja vratila na kućište motora. Kako je pumpa izvorno centrifugalnog tipa za korištenje na ronilici bilo je potrebno ukloniti uobičajeni rotor pumpe te na vratilo izvan kućišta pričvrstiti elisu s tri lopatice promjera 55 mm. Kako bi se elisa mogla pričvrstiti na vratilo pumpe izrađeno je mjedeno vratilo promjera 6 mm s odgovarajućim navojem za elisu. Spoj elise osiguran je od odvrtnja dodatnom maticom. Kućište motora pričvršćeno je na nosač propulzora prirubnicom i vijcima kako bi u slučaju oštećenja motor bilo moguće zamijeniti.



Slika 5.2: *Propulzor*

Ista je procedura sa digitalnim servomotorom samo što se umjesto PWM šalje digitalni signal koji traje određeno vrijeme propisano od strane proizvođača u ovisnosti o kutu zakreta servomotora kojeg zadaje korisnik.



Slika 5.3: *Multiplex Royal digitalni servomotor* [5]

U ovom slučaju radi se o Multiplex Royal digi servomotoru (5.3) dimenzija 41 mm x 21 mm x 41 mm i mase 46 g, koji radi na 5 V DC i služi za zakretanje kamere oko y osi [5].

5.1.2 Snimanje visokokvalitetnih videozapisa

Visokokvalitetnom kamerom GoPro Hero (5.4) snima se u rezoluciji do 1920x1080 piksela 30 sličica (frame-ova) u sekundi. Dimenzije kamere su 42 mm x 60 mm x 30 mm, mase 94 g. Kamera može snimati automatski 5MPx fotografija u razmaku od 2/5/10/30 i 60 sekundi za vrijeme vožnje koje sprema u svoju vlastitu memoriju - 32 GB veliku SD karticu [6].



Slika 5.4: Kamera GoPro HD Hero [6]

5.1.3 Kamera za upravljanje

Za razliku od visokokvalitetne kamere analogna kamera (5.5) je pričvršćena na servomotor koji joj omogućuje okretanje oko aksijalne osi te se koristi za manevriranje podvodnim vozilom. Naime, video analogni signal kamera šalje preko 50 m koaksijalnog kabla do TV kartice koja ga pretvara u digitalni te preko USB ulaza šalje u PC na kojem je osmišljeno korisničko sučelje u programskom paketu "Delphi" što je zapravo objektni "Pascal" gdje se prikazuje taj digitalizirani video signal.



Slika 5.5: Analogna kamera

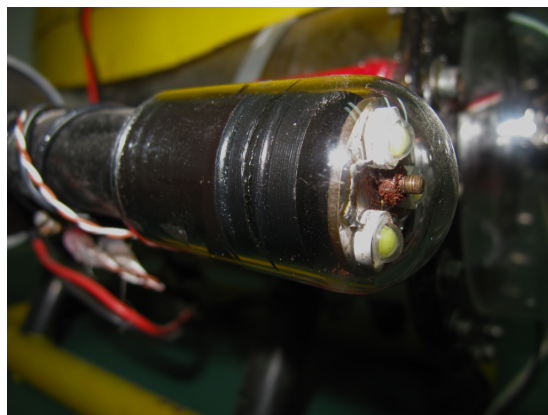
5.1.4 Napajanje i osvjetljenje sustava

Cijeli sustav se napaja iz FIAMM FG20722 12 V DC, 7.2 Ah akumulatora (5.6) osim PC-a i video podsustava koji imaju vlastito napajanje. Dimenzije akumulatora su 151 mm x 65 mm x 94 mm, dok mu masa iznosi 2.43 kg [7].



Slika 5.6: Akumulatorska baterija FIAMM FG20722 [7]

Rasvjetna tijela (5.7) potrebna za osvjetljavanje radnog prostora podvodnog vozila izrađena su korištenjem svjetlećih LED dioda [24] velikog toka svjetlosti 6 mm koja rade na 12 V DC i proizvode 100 lm. Kućište u kojem se nalaze diode izrađeno je obradom odvajanjem od konstrukcijske plastike POM (poliacetal), a kupola kroz koju prolazi svjetlo u okolinu od laboratorijskog stakla debljine 2 mm. Brtvljenje između kućišta i kupole izvedeno je kao automatsko korištenjem "O" brtvi. Svjetleća diode smještene su unutar kupole na tiskanoj pločici te za kućište pričvršćene mjedenom šipkom koja je u kontaktu s okolnim medijem te time osigurava potrebno odvođenje topline sa svjetlećih dioda. Kablovi za napajanje svjetla prolaze kroz kućište a brtvljenje je ostvareno epoksidnom smolom.



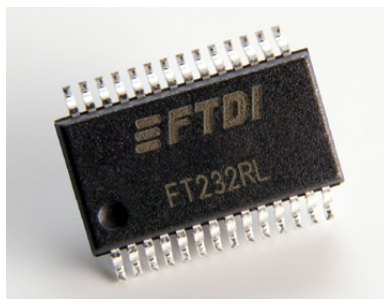
Slika 5.7: Rasvjetno tijelo

5.2 Projektiranje modula sustava upravljanja

Svi moduli, tj. tiskane pločice (komunikacijski, mikrokontroler i motor driver) su projektirani u programu Altium Designer. Tiskane pločice služe za učvršćivanje elektroničkih i elektromehaničkih komponenata za čvrstu podlogu i međusobnu električku povezanost. Nakon konstrukcije elektroničke sheme koje se nalaze u prilogu B, prelazi se u prozor za dizajniranje tiskane pločice. Program automatiziranim procesom postavlja elemente dodane na shemu, uzimajući u obzir njihove realne oblike i dimenzije, kao i njihove međusobne veze. Elemente je potrebno razmjestiti unutar okvira koji predstavlja tiskanu pločicu. Zatim još treba izraditi spojeve među elementima. A o samoj izradi tiskanih pločica govorit će se u sljedećem potpoglavlju.

5.2.1 Komunikacijski modul

Komunikacijski modul je ostvaren pomoću integriranog kruga FT232RL (5.8) koji omogućava pretvorbu USB u RS232 komunikaciju te tako povezuje PC preko 50 m UTP kabla sa mikrokontrolerom. Cijeli modul radi na 5 V DC, s tim da se standardna komunikacija pretvara u strujnu kako ne bi došlo do gubitka signala duž kabla zbog dužine istog (50 m) prilikom prijenosa podataka [8].



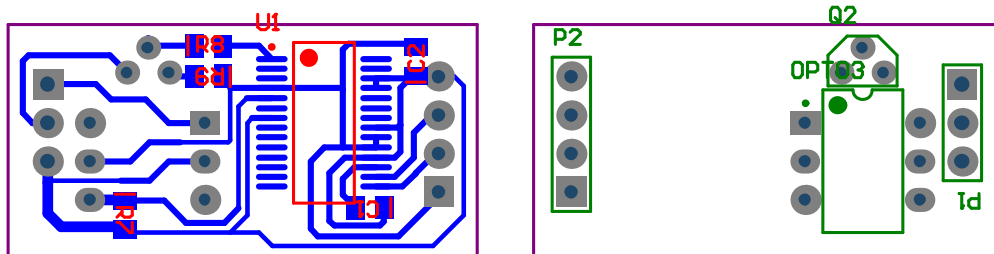
Slika 5.8: *FT232RL integrirani krug* [8]

Neke od glavnih značajki ove komponente (FT232RL) [8] su:

- nazivni napon iznosi 5 V DC
- kontrola nad cijelim USB protokolom preko FT232RL čipa - nije potrebno posebno USB firmware programiranje,
- niska potrošnja USB protoka,

- integrirani 3.3 V level converter za USB I/O,
- integrirani USB otpornici.

Izgled pločice u mjerilu 2:1 zbog bolje preglednosti:



Slika 5.9: Izgled tiskane pločice komunikacijskog modula (donja i gornja strana)

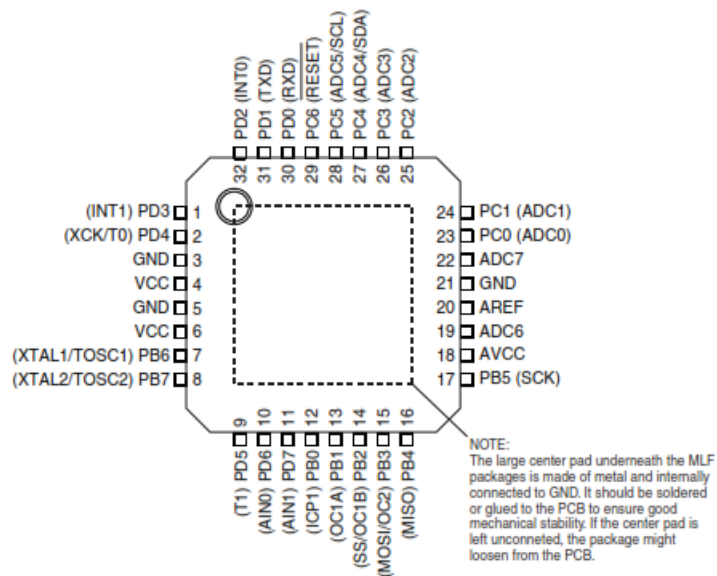
Popis dijelova potrebnih za izradu modula:

Tablica 5.1: Komponente komunikacijskog modula

Opis	Oznaka	Količina
100nF	C1, C2	2
4N25	OPTO3	1
BC337	Q2	1
4k7	R7, R8	2
150R	R9	1
FT232RL	U1	1

5.2.2 Modul s mikrokontrolerom i senzorom tlaka

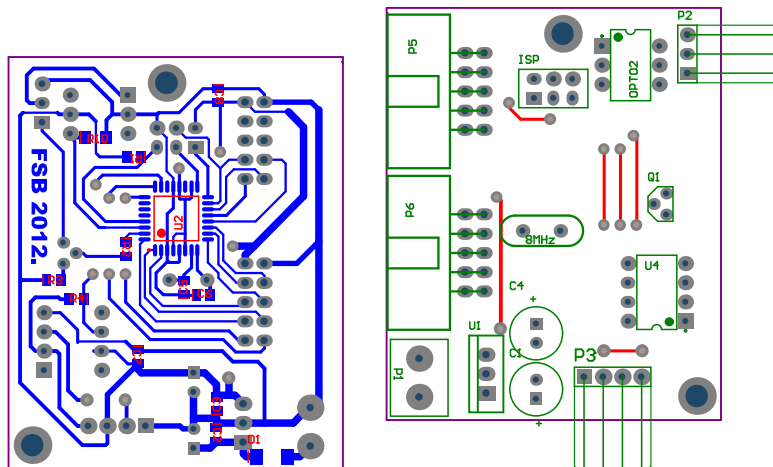
Na ovoj pločici (modulu) se nalazi mikrokontroler, a to je elektronički uređaj koji predstavlja mozak svakog sustava pa tako i ovog. To znači da on upravlja svim funkcijama vezanim za sustav kojeg nadzire. Može imati analogne i digitalne ulaze i izlaze, pa shodno tome A/D i D/A konvertere [25]. U ovom slučaju izabran je 8-bitni mikrokontroler ATmega8A (5.10) tvrtke Atmel.

Slika 5.10: *ATMEL ATmega8A* mikrokontroler [9]

Cijeli modul radi na 5 V DC, a akumulator daje 12 V DC pa je potreban stabilizator napona 7805 te nekoliko kondenzatora za stabilan napon. Time se dobiju 2 naponske razine: 5 V za napajanje mikrokontrolera, senzora tlaka i servomotora te 12 V za napajanje izvršnih uređaja (pogonskih motora i svjetala). Kako bi mikrokontroler mogao raditi potreban mu je oscilator koji mu daje takt, tj. frekvenciju rada. Odabran je oscilator od 8 MHz [9]. Glavne karakteristike mikrokontrolera su:

- USART komunikacija,
- frekvencija do 16 MHz,
- 8 KB flash memorije,
- 512 B EEPROM memorije,
- 3 PWM izlaza,
- 2 8-bitna i 1 16-bitni timer,
- 1 KB SRAM memorije,
- 8-kanalni A/D konverter,
- Watchdog Timer,
- SPI sučelje.

Izgled pločice u prirodnoj veličini:



Slika 5.11: Izgled tiskane pločice modula s mikrokontrolerom (donja i gornja strana)

Popis dijelova potrebnih za izradu modula:

Tablica 5.2: Komponente modula s mikrokontrolerom

Opis	Oznaka	Količina
Quartz 8MHz	X1	1
100uF	C1, C4	2
100nF	C2, C3, C7, C8	4
22pF	C5, C6	2
1N4007	D1	1
Header 3X2	ISP	1
4N25	OPTO2	1
Redna stezaljka 2P	P1	1
Header 3 90°	P2	1
Header 4 90°	P3	1
Header 5x2	P5, P6	2
BC337	Q1	1
4k7	R1, R2	2
150R	R3	1
220k	R4	1
4k7	R10	1
7805	U1	1
ATmega8-16AU	U2	1
UA741	U4	1

Na ovaj se modul spaja i već spominjani senzor tlaka tvrtke Motorola serije MPXM2202 (5.12) koji radi na principu piezoelektričnog otpora tako da osjeti pritisak. Može mjeriti od

0-200 kPa, vrijeme odziva mu je 1 ms i radi na 5V DC. Kako s porastom dubine raste i hidrostatski tlak taj senzor će praktički davati informaciju o dubini na kojoj se podvodno vozilo nalazi [10].



Slika 5.12: *Senzor tlaka Motorola MPXM2202* [10]

Analogni signal iz senzora se prvo pojačava pojačalom UA741, a zatim ide u mikrokontroler na A/D pretvorbu da bi se, sad već s digitalnim signalom moglo dalje baratati. Na ovom modulu također je izvedeno upravljanje osvjetljenjem tako da je podjeljeno na dvije razine. U početku su upaljena svjetla s pola snage, a po potrebi se može uključiti maksimalno osvjetljenje.

Programiranje mikrokontrolera

Kod za mikrokontroler, koji je u dodatku A objašnjen, pisan je u C jeziku u programu MikroC PRO for AVR tvrtke Mikroelektronika [11]. Program ima mnoštvo gotovih funkcija pa se programiranje svodi samo na rješavanje problema koji mikrokontroler treba izvršavati. Tako napisan kod program prevodi u strojni jezik koji je razumljiv mikrokontroleru. Kako bi se taj kod prenio u mikrokontroler potreban je programator. U ovom slučaju je korišten programator AVR MKII (5.13) tvrtke Atmel koji se spaja na ISP port za programiranje.



Slika 5.13: *ATMEL AVR MKII programator* [11]

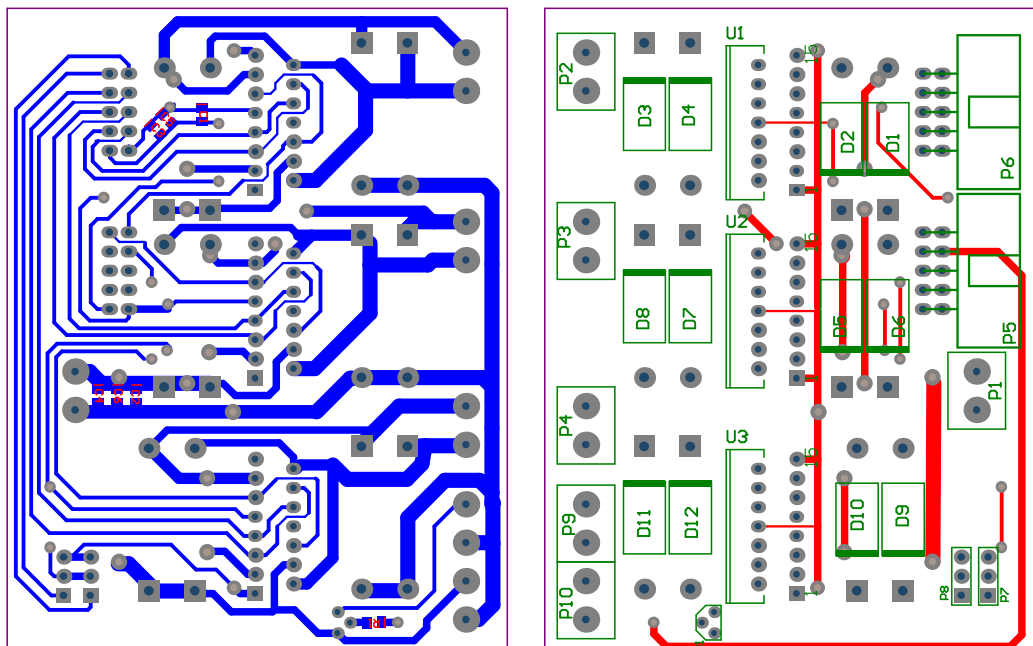
5.2.3 Modul s driver-ima

Ovaj modul "sluša" naredbe modula s mikrokontrolerom te se ponaša u skladu s njima, a sastoji se od tri driver-a koji pokreću pogonske motore, zaštitnih dioda te konektora za spajanje na druge module ili aktuatore. Ovdje se koristi driver za motore L298 tvrtke STMikroelektronika (5.14), koji radi na 5 V DC i kroz koji može proći maksimalno 4 A DC [12].



Slika 5.14: Driver za pogonske motore [12]

Izgled pločice u prirodnoj veličini:



Slika 5.15: Izgled tiskane pločice modula s driver-ima (donja i gornja strana)

Dakle, kada se pošalje PWM signal na driver nekog motora u njemu tranzistor pusti jaku struju koja pokreće motor. Na ovoj se pločici nalazi tranzistor čijim se uključivanjem aktivira druga razina osvjetljenja.

Popis dijelova potrebnih za izradu modula:

Tablica 5.3: *Komponente modula s driver-ima*

Opis	Oznaka	Količina
100nF	C1, C2, C3, C4, C5, C6	6
1N5819	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12	12
Redna stezaljka 2P	P1, P2, P3, P4, P9, P10	6
Header 5x2	P5, P6	2
Strip	P7, P8	2
BC337	Q1	1
10k	R1	1
L298N	U1, U2, U3	3

5.3 Izrada tiskanih pločica

Elektronički sklop predstavlja skup raznih elektroničkih komponenata koje su vodičima povezane određenim redom kako bi gotov elektronički sklop spojen u strujni krug obavljao željenu funkciju. Povezivanje elektroničkih komponenata izvodi se na tiskanim pločicama. Najčešće korišteni materijal za tiskane pločice je FR-4 poznatiji kao vitroplast koji se sastoji od niza slojeva (7-9) staklenih tkanina impregniranih s epoxy smolom na koji je kaširana (nalijepljena) bakrena folija s jedne (jednostrana pločica) ili obje strane (dvostana pločica). Dijelovi bakrene folije, koji nakon tehnološke obrade ostanu sačuvani na tiskanoj pločici i služe za povezivanje elektroničkih komponenata nazivaju se tiskani vodovi. Tiskane vodove čine lemna mjesta na koja se montiraju i spajaju izvodi elektroničkih komponenata i linije ili površine (poligoni) koji povezuju dva ili više lemnih mjesta. Širina tiskanih vodova ovisi o struji koja će protjecati kroz pojedini tiskani vod [15]. Dozvoljeno opterećenje tiskanih vodova prikazano je u tablici (5.4).

Tablica 5.4: *Širina vodova s obzirom na dopuštenu struju [15]*

ŠIRINA VODA		DOZVOLJENA STRUJA
mils	mm	A
15	0.381	1.0
30	0.762	2.3
50	1.27	3.5
100	2.54	6.0
1 mil = 1/100 inch = 0.0254 mm		

Kod projektiranja tiskane pločice potrebno je voditi računa o estetici prilikom rasporeda

komponenata, a da pri tome tiskani vodovi budu što kraći. Projektiranjem se izrađuje shema montaže komponenata, shema tiskanih vodova i shema plana bušenja. Ako se radi o dvostranim pločicama potrebne su shema montaže i shema tiskanih vodova za svaku pojedinu stranu. Jednostavnije sheme mogu se nacrtati na papiru pomoću pribora za ctranje, ali danas se uglavnom koriste programi za projektiranje tiskanih pločica računalom (Altium Designer, P-CAD, Protel, Ultiboard, Eagle, PADS itd.). Nakon projektiranja izrađuju se predlošci za nanošenje zaštitnih maski. Tehnološke operacije u izradi tiskane pločice su slijedeće:

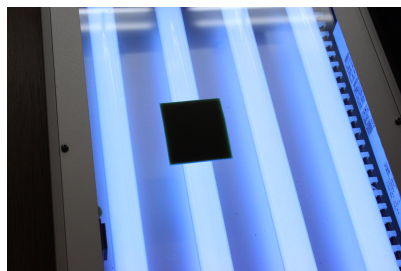
5.3.1 Čišćenje bakrene površine

S obzirom da bakar korodira u dodiru sa zrakom, potrebno je prije nanošenja maske za tiskane vodove ukloniti oksidacijski sloj i prljavštinu s bakrene površine tiskane pločice. To se može učiniti brušenjem profesionalnim strojem za četkanje bakrene površine tiskanih pločica, nitro razrjeđivačem, kućnim sredstvom za skidanje kamenca (Arf, Vim...), vibracijskom brusilicom ili najjednostavnije finom čeličnom vunom koja ne sadrži nikakve kemijske dodatke. Ako se bakrena površina čisti čeličnom vunom pločica se pobrusi najprije paralelno sa jednom stranicom tiskane pločice, a zatim se pločica zakrene za 90° i ponovi postupak. Nakon brušenja bakrenu površinu je potrebno protraljati po čistom papiru i ne više dodirivati prstima [15].

5.3.2 Nanošenje zaštitnog sloja - fotopostupak

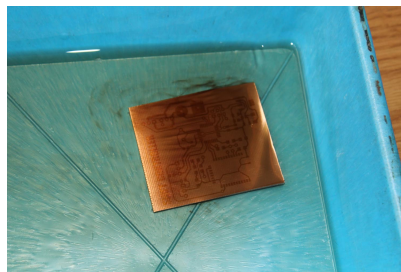
Ovisno o željenoj kvaliteti gotove tiskane pločice, količini i troškovima izrade, postoje razne tehnike nanošenja zaštitnog sloja (maske) na bakrenu površinu (foliju) gdje se želi sačuvati dijelove bakra kao tiskane vodove ali u ovom projektu se koristio, najuobičajniji, fotopostupak. Postupak započinje nanošenjem krutog (folija) ili tekućeg fotoosjetljivog filma na čistu bakrenu foliju pločice uz prigušeno svjetlo. Kruti film se postavlja laminiranjem pri temperaturi od 120 °C uz pritisak 2 do 3 bara, uređajem koji se zove laminator. Tekući film nanosi se pomoću spreja sa udaljenosti 20 - 30 cm pod kutom 25° - 30° od podloge. Sprej treba nanijeti ravnomjerno i u što tanjem sloju jer što je lak deblji treba ga duže sušiti, osvjetljivati i razvijati. Nakon toga potrebno je njegovo sušenje u potpunom mraku. Postupak sušenja će se skratiti ako se izvodi u pećnici na toplom zraku maksimalne temperature 70 °C. Na fotoslojenu pločicu pozicionira se pozitiv predložak (film ili folija) i zatim se vrši osvjetljavanje pločice UV svjetlom (5.16) nekoliko minuta (oko 2 minute) ili običnom štednom žaruljom 7-8 minuta. Kroz prozirne dijelove predloška UV svjetlo prodire na fotoosjetljivi film, a ispod

crnih mjesta predložka fotoosjetljivi film ostaje neosvjetljen [15].



Slika 5.16: *Osvjetljavanje tiskane pločice*

Osvjetljena pločica stavlja se u razvijач (5.17) za što se koristi 1%-tna otopina natrij karbonata (Na_2CO_3) ili otopina natrijeve lužine koja se dobiva tako da se 7 grama natrij hidroksida (NaOH) otopi u 1 litri hladne vode. Trajanje razvijanja kod svježeg razvijачa iznosi 0.5 do 1 minute ili maksimalno 2 min za deblje slojeve fotoosjetljivog filma. Nakon razvijanja, pločica se ispere u vodi pri čemu će sloj filma ostati na dijelovima koji su prilikom osvjetljavanja bili zaštićeni crnim površinama predložka. Fotopostupak predstavlja najprecizniji način izrade zaštitne maske kod nagrizanja tiskane pločice, a osim za izradu maski za nagrizanje koristi se izradu maski za metalizaciju i lemno otpornih, elektro izolacijskih maski. Ovaj postupak je korišten i pri izradi tiskanih pločica za opisani elektronički upravljački sklop.



Slika 5.17: *Razvijanje tiskane pločice*

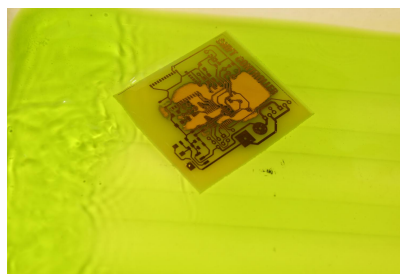
5.3.3 Jetkanje pločica

Nakon što je nanesena zaštitna maska vrši se jetkanje ili nagrizanje (5.18) nazaštićenih dijelova bakrene folije. Jetkanje se izvodi kemijskim postupcima, a najpogodnija otopina za jetkanje u 1l otopine sadrži:

- 770 ml vode

- 200 ml solne kiseline (HCl) koncentracije 30%
- 30 ml vodikovog peroksida (H₂O₂) koncentracije 30%

Solna kiselina i vodikov superoksid su opasne, nagrizajuće i agresivne tekućine te je prilikom rukovanja potreban najveći oprez i obavezna upotreba zaštitnih sredstava (zaštitne naočale, rukavice i pregača). Otopina se priprema tako da se prvo u vodu ulije solna kiselina, a zatim peroksid. Postupak jetkanja traje nekoliko minuta, a može se ubrzati strujanjem otopine u posudi upuhivanjem zraka u otopinu pomoću električne pumpe za zrak ili laganim ljuljanjem posude u kojoj se vrši jetkanje. Kada bakrena folija nestane sa svih nezaštićenih dijelova, jetkanje je završeno, a pločice se ispere u vodi i osuši.



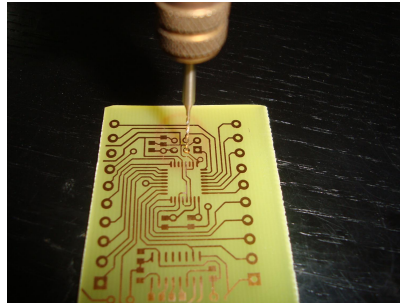
Slika 5.18: *Jetkanje tiskane pločice*

5.3.4 Skidanje (čišćenje) maske sa tiskanih vodova

Nakon jetkanja potrebno je odgovarajućim otapalom, npr. acetonom ili nitro razrjeđivačem, skinuti sloj fotolaka s tiskanih vodova na pločici, a za zaštitu od korozije istih pločica se može preprskati plastic lakom ili pokositriti. Kositrenje se provodi tako što se lemilica lagano prisloni uz bakar, doda se lemne žice i u tankom sloju razmaže po površini.

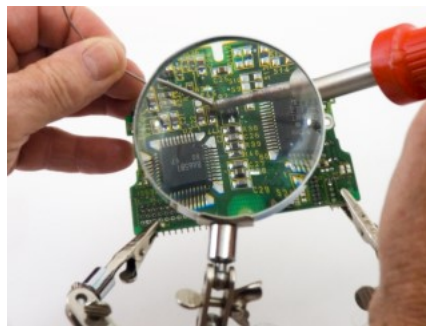
5.3.5 Bušenje provrta

Na lemnim mjestima potrebno je pomoću stolne bušilice probušiti provrte (5.19), a promjer odabranog svrdla ovisi o promjeru ili širini izvoda komponente koja se kroz pripadajuće provrte montira.

Slika 5.19: *Jetkanje tiskane pločice*

5.3.6 Lemljenje

Lemljenje je najvažnija radnja pri sastavljanju elektroničkih sklopova, stoga je najprije potrebno naučiti kako se ispravno provodi. Za početak, potrebno je lemilo 18-30 W i tinol žica debljine 0,6-1,5 mm. Najveća pogreška je kada se na vrh lemila pritisne žica za lemljenje, tako se dobije kapljica rastopljenog kositra koja se donosi na mjesto gdje treba ostvariti spoj. Pravilan je način da se vrhom lemila zagrijava priključna žica elektroničkog elementa. Ona prvo otopi sredstvo za lemljenje koje zalije čitavo mjesto spoja, na koje se onda u nastavku razlije rastopljeni kositar. Vrh lemila se ne smije odmaknuti odmah, već treba pričekati da kositar poprimi jednoličnu srebrnu boju. Dobar lemni spoj je, nakon što se ohladi, gladak, a boja mu je mat-srebrna. Uz pojam lemljenja često se javlja i pojam hladnih spojeva. To su spojevi koji su na prvi pogled u redu, ali su zapravo trajno ili povremeno bez kontakta. Hladni spojevi mogu nastati odmah, ali i nakon nekog vremena. Hladni spojevi se izbjegavaju dovoljno dugim držanjem lemila na mjestu koje se lemi, no ne valja pretjerati, jer može doći do oštećenja osjetljivih poluvodičkih sastavnih elemenata ili bakrene folije. U takvim situacijama obično nema druge pomoći nego "pokrpati" mostovima od žice što, iako je praktično, kvari estetski izgled i "profesionalnost" tiskane pločice (5.20).

Slika 5.20: *Tehnika lemljenja* [13]

6 Korisničko grafičko sučelje

Na PC-u je, u programskom paketu "Delphi" - objektni "Pascal", izrađeno korisničko grafičko sučelje u kojem se prikazuju smjerovi kretanja ROV-a, tj. smjerovi kretanja triju i postotak snage dvaju pogonskih motora. Također je prikazana trenutna dubina ROV modela te je dana mogućnost da korisnik tipkovnicom unese željenu dubinu pa se taj podatak preko serijske veze šalje u mikrokontroler koji na temelju istog regulira vertikalni pogonski motor i tako održava zadanu dubinu. Još je omogućen i konstantan prikaz video signala koji dolazi preko TV kartice.

6.1 Opis bitnijih dijelova programskog koda

Inače, zamišljeno je da se ovisno o smjeru pomaka na joystick-u mijenjaju slike izrađene za taj isti smjer i pomak. A način na koji je to izvedeno bit će opisan u daljnjim potpoglavljima.

6.1.1 Definicija sučelja

```
1: procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject); // kreiranje sučelja
2: begin
3:   Form1.ClientWidth := 760; // dimenzije sučelja
4:   Form1.ClientHeight := 683;
5:   IL_U.GetBitmap(0, I_U.Picture.Bitmap); // mape sa slikama za smjerove i pomake
6:   IL_L.GetBitmap(0, I_L.Picture.Bitmap);
7:   IL_D.GetBitmap(0, I_D.Picture.Bitmap);
8:   IL_R.GetBitmap(0, I_R.Picture.Bitmap);
9:   IL_U.GetBitmap(0, I_G2.Picture.Bitmap);
10:  IL_D.GetBitmap(0, I_D2.Picture.Bitmap);
11:  Form1.Doublebuffered := true; //zaustvalja intenzivno titranje slika
12:  du := 0.1;
13:  s_du := 'Inkrement promjene dubine za joystick: '; // inkrement promjene dubine
14:  L_ink.Caption := s_du + floattostr(du);
15: end;
```

Nakon inicijalizacije varijabli i elemenata korištenih u programu potrebno je stvoriti proceduru koja će stvoriti sučelje pri pokretanju programa. U sljedećem kodu korištena je i već u samom programskom paketu definirana funkcija 'DoubleBuffered' koja sprječava intenzivno treptanje slika.

6.1.2 Funkcija RD

```

1: Function RD(X : extended) : string;           // definicija funkcije
2:   var S : string;                             // inicijalizacija varijable 'S'
3:   begin
4:     if x = 1 then Result := '100'
5:     else if x = -1 then Result := '-100'
6:     else if x = 0 then Result := '0'
7:     else
8:       begin
9:         S := format('%n' , [frac(X)]);         // naredba za formatiranje stringa
10:        if S[1] = '-' then
11:          Result := S[1] + S[4] + S[5]         // negativne vrijednosti
12:        else
13:          Result := S[3] + S[4];               // pozitivne vrijednosti
14:        end;
15:      end;

```

Funkcija 'RD' očitava vrijednost pomaka joystick-a koji je u rasponu od -1 do 1 (do ovih vrijednosti se došlo eksperimentalno) te ih pretvara u vrijednosti od -100 do 100 zbog lakše podjele kod prikaza snage motora.

6.1.3 Definicija inkrementa promjene dubine za joystick

Da bi se omogućilo razumijevanje vrijednosti koje šalje joystick korišten je dodatni programski paket 'NLDJoystick' koji u sebi sadrži već definirane funkcije za interakciju s joystickom. Jedna od njih je korištena i u ovoj proceduri gdje se, u ovisnosti o tome koja je tipka aktivirana, povećava ili smanjuje inkrement promjene dubine.

```

1: procedure TForm1.NLDJoystick1ButtonDown(Sender: TNLDJoystick;
2:   const Buttons: TJoyButtons);
3: begin
4:   if 5 in Buttons then // povećavanje inkrementa promjene dubine za 0.1
5:     begin
6:       du := du + 0.1;
7:       if du > 10 then
8:         du := 10;
9:     end;
10:  if 6 in Buttons then // smanjivanje inkrementa promjene dubine za 0.1
11:    begin
12:      du := du - 0.1;
13:      if du < 0.1 then
14:        du := 0.1;
15:    end;
16:  if 7 in Buttons then // povećavanje inkrementa promjene dubine za 1
17:    begin
18:      du := du + 1;
19:      if du > 10 then
20:        du := 10;
21:    end;
22:  if 8 in Buttons then // smanjivanje inkrementa promjene dubine za 1
23:    begin
24:      du := du - 1;
25:      if du < 0.1 then
26:        du := 0.1;
27:    end;
28:  L_ink.Caption := s_du + floattostr(du); // prikaz dubine
29: end;

```

6.1.4 Očitavanje podataka sa joystick-a i filtracija istog

Također postoji već zadana funkcija u navedenom paketu za čitanje podatka o pomaku. A zbog loše kvalitete samog joystick-a bilo je potrebno napraviti filtraciju i to tako da se sve vrijednosti ispod 0.15 izjednače s nulom jer je joystick u stanju mirovanja davao nekakve nasumične vrijednosti u rasponu od -0.15 do 0.15.

```

1: procedure TForm1.NLDJoystick1Move(Sender: TNLDJoystick;
2:   const JoyPos: TJoyRelPos; const Buttons: TJoyButtons);
3: var y,z,r : extended;
4:     yf,zf,rf : shortint;
5: begin
6:   //FILTRACIJA SVEGA ISPOD 0.15 ZBOG STATIČKE POGREŠKE JOYSTICA
7:   y := Joypos.y; if y > 0.15 then y := Joypos.y
8:     else if y < -0.15 then y := Joypos.y else y:=0;
9:   z := Joypos.z; if z > 0.15 then z := Joypos.z
10:    else if z < -0.15 then z := Joypos.z else z:=0;
11:   r := Joypos.r; if r > 0.15 then r := Joypos.r
12:    else if r < -0.15 then r := Joypos.r else r:=0;
13:

```

6.1.5 Mijenjanje slika u ovisnosti o pomaku joystick-a

Maksimalna snaga (100 %) pogonskih motora se podijelila na 10 dijelova i svaka podjela ima svoju sliku. Smjerovi gibanja ROV-a su prikazani strelicama. Dakle, uzima se podatak koji se pošalje sa joystick-a, pretvori ga se iz *string* formata u *integer* kako bi se mogla izvršiti petlja komparacije. U ovisnosti o tome koliki je pomak, prikazat će se pripadajuća slika strelice. Slike se dobivaju pomoću funkcije 'TCustomImage.GetBitmap', a prije svake promjene sve slike strelica se izjednačuju s nulom da bi se izbjeglo nepotrebno titranje slike. Kod pozitivnih vrijednosti pomaka radi se sa apsolutnom vrijednosti podatka, a kod negativnih vrijednosti, naravno suprotno. Sljedeći kod ponavlja se za sva tri pogonska motora.

```

1: rf := strtoint(RD(r)); // pretvorba podatka u integer
2: if rf = 0 then
3: begin
4:   I_U.Picture.Bitmap := nil; // strelica gore
5:   I_D.Picture.Bitmap := nil;
6:   IL_U.GetBitmap(0, I_U.Picture.Bitmap); // uzimanje slike iz pripadajuće mape
7:   IL_D.GetBitmap(0, I_D.Picture.Bitmap);
8: end
9: else if rf < 0 then
10: begin
11:   if abs(rf) < 20 then
12:     begin
13:       I_U.Picture.Bitmap := nil;
14:       I_D.Picture.Bitmap := nil;
15:       IL_U.GetBitmap(1, I_U.Picture.Bitmap);
16:       IL_D.GetBitmap(0, I_D.Picture.Bitmap);
17:     end
18:     .
19:     .
20:   else if abs(rf) < 100 then
21:     begin
22:       I_U.Picture.Bitmap := nil;
23:       I_D.Picture.Bitmap := nil;
24:       IL_U.GetBitmap(9, I_U.Picture.Bitmap);
25:       IL_D.GetBitmap(0, I_D.Picture.Bitmap);
26:     end
27:   else if abs(rf) = 100 then
28:     begin
29:       I_U.Picture.Bitmap := nil;
30:       I_D.Picture.Bitmap := nil;
31:       IL_U.GetBitmap(10, I_U.Picture.Bitmap);
32:       IL_D.GetBitmap(0, I_D.Picture.Bitmap);
33:     end;
34: end

```

6.1.6 Prikaz video signala i trenutne dubine

Video signal se prikazuje pomoću komponente 'TVLDSCapture' i funkcije 'TVLImageDisplay' iz paketa 'VideoLab'. Dok se trenutna dubina prikazuje preko komponente 'TILLinearGauge' iz paketa 'InstrumentLab', a to je zapravo mjerna ljestvica. Za komunikaciju sa senzorom tlaka i upravljačkim sklopom općenito potrebno je instalirati paket 'COMPort' pomoću kojeg je moguće slati i primiti podatke preko serijske veze.

6.1.7 Prikaz snage dvaju bočnih motora

```

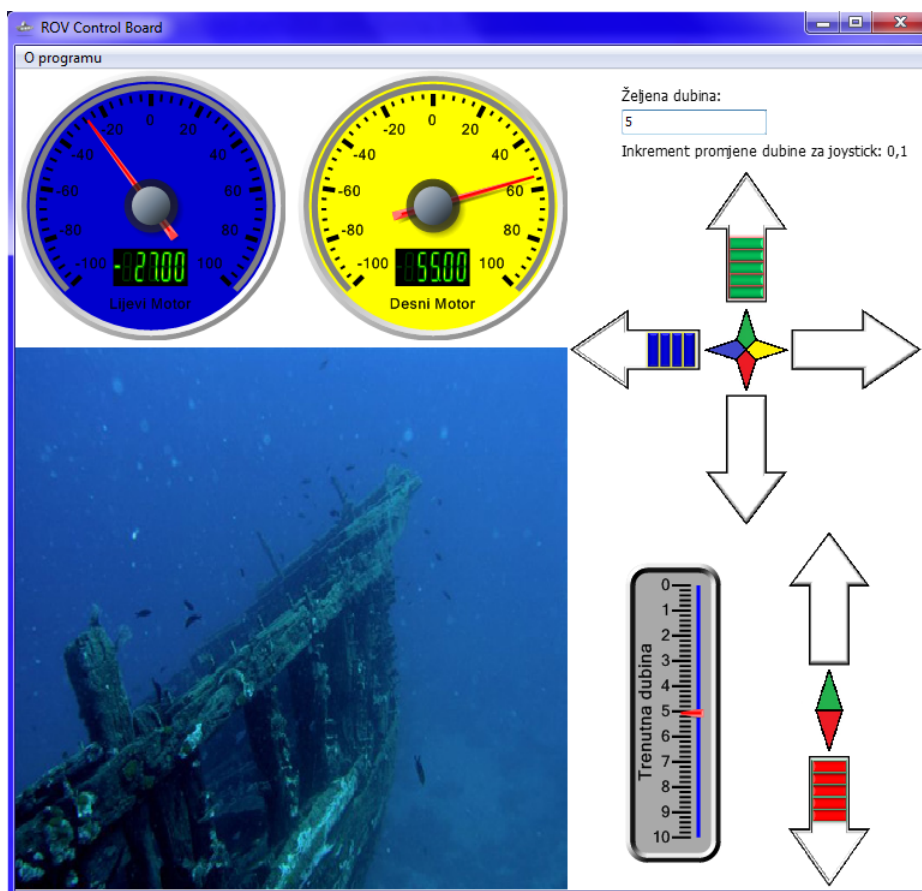
1: if rf = 0 then           // podmornica pluta/stoji
2:   if zf = 0 then
3:     begin
4:       PMD.Value := 0; PML.Value := 0;
5:     end;
6:   if rf > 0 then // gibanje unatrag (bez skretanja)
7:     begin
8:       PMD.Value := -1 * rf; PML.Value := -1 * rf;
9:     end
10:  else
11:    begin
12:     if zf = 0 then // ravnomjerno gibanje prema naprijed
13:       begin
14:         PMD.Value := abs(rf); PML.Value := abs(rf);
15:       end
16:     else if zf > 0 then // gibanje u desno
17:       begin
18:         PML.Value := abs(rf);
19:         if rf = 0 then
20:           PMD.Value := (abs(rf) - zf)
21:         else
22:           PMD.Value := (abs(rf) - zf * 2);
23:         end
24:       else           // gibanje u lijevo
25:         begin
26:           PMD.Value := abs(rf);
27:           if rf = 0 then
28:             PML.Value := (abs(rf) + zf)
29:           else
30:             PML.Value := (abs(rf) + zf * 2);
31:           end;
32:         end;
33:       end;

```

Kao što je već rečeno, maksimalna snaga motora se izjednačila sa vrijednosti 100 % u jednom i u drugom smjeru te se kao takva prikazuje na strelicama i (za dva bočna motora) na kružnim pokazivačima iz paketa 'InstrumentLab'.

6.2 Konačan izgled sučelja

Nakon pokretanja objašnjenog programskog koda stvara se grafičko sučelje kao što je prikazano na slici (6.1).

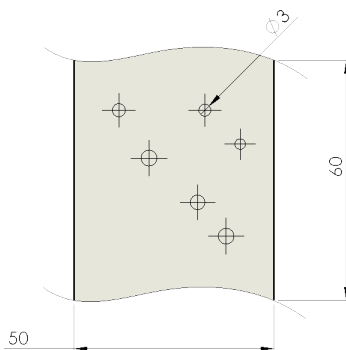


Slika 6.1: *Korisničko grafičko sučelje*

7 Ispitivanja podvodnog vozila

7.1 Ispitivanje u vodi

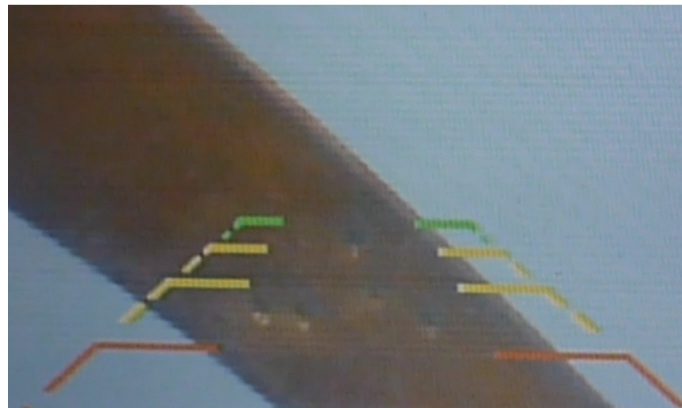
Kako bi se ispitalo konstruirano podvodno vozilo u realnim uvjetima rada, izvršeno je pokusno ronjenje s pregledavanjem metalne konstrukcije pod vodom. Ronjenje je obavljeno u bazenu Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije pri Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. S obzirom da se daljinski upravljana podvodna vozila inspekcijske klase većinom koriste za pregled i procjenu oštećenja na metalnim konstrukcijama pod vodom kao zadatak za ispitivanje sustava odabran je pregled kvadratne šavne cijevi od konstrukcijskog čelika. Prije polaganja u bazen cijev je oštećena udarcima točkala kao što je prikazano na slici (7.1).



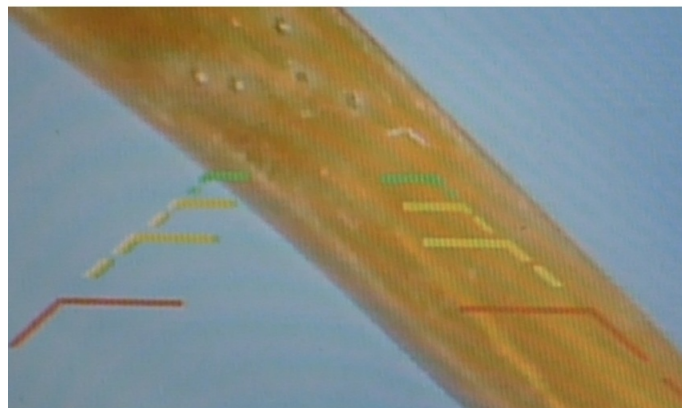
Slika 7.1: *Skica oštećenja šavne cijevi*

Osim umjetno stvorenih oštećenja, kako bi se što bolje simulirala realna situacija u vodi, odabrana je cijev zahvaćena općom korozijom. Misija koju je trebalo izvršiti podvodnim vozilom sastojala se od zarona na dubinu od 1 m i horizontalne vožnje do položene cijevi te izrona do 0.5 m dubine prateći i pregledavajući cijev. Pilot podvodnog vozila nije bio unaprijed obaviješten o poziciji i postojanju oštećenja kako bi se moglo ispitati kvalitetu grafičkog sučelja i slike s kamere. Zadatak je obavljan tri puta sa tri različita pilota prvo na danjem svjetlu, a kasnije i u mraku kako bi se simulirali uvjeti rada u zatvorenom prostoru nekog spremnika ili olupine. Piloti su svaki put uspješno pronašli i snimili oštećenja unutar 5 minuta od početka misije na dnevnom svjetlu te 7 minuta u mraku. U drugom dijelu

ispitivanja tražena su oštećenja duž horizontalno položene cijevi na dnu bazena. Misija se sastojala od zarona na 1 m dubine te horizontalnog manevra na 5-10 cm iznad cijevi u svrhu pretraživanja površine. Za razliku od prvog, cilj drugog zadatka bio je ispitati mogućnosti pomicanja kamere za vrijeme vožnje te utjecaj pomicanja na orijentaciju pilota prilikom manevra. Tijekom horizontalnog manevra iznad cijevi pilot je kako bi pregledao površinu cijevi kameru morao zakrenuti u najniži položaj te, orijentirajući se isključivo prema cijevi, pretraživati površinu. S obzirom da nije moguće zakretati svjetla, prilikom ovog zadatka piloti su nešto teže pronalazili oštećenja no sva su uspješno pronađena u roku od 10 minuta.



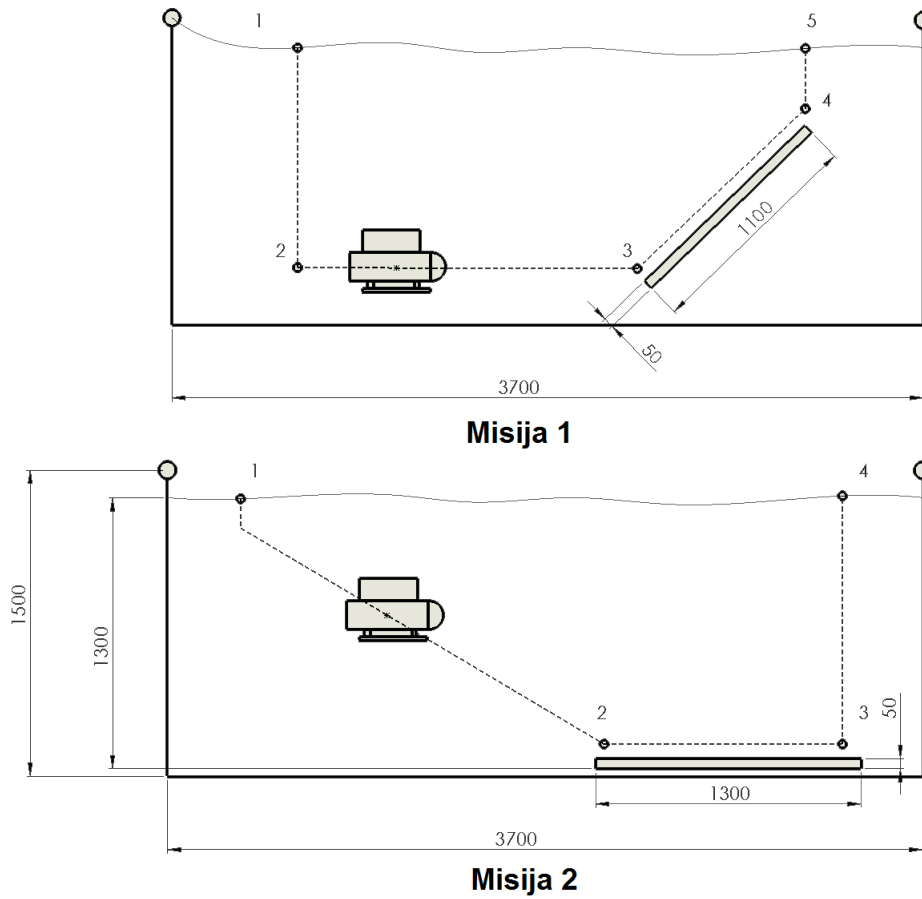
Tama



Svjetlo

Slika 7.2: Rezultati ispitivanja: mrak i svijetlo

Isto tako primjećeno je da korištenje rasvjete znatno poboljšava kvalitetu slike s kamere što se vidi na slici (7.2) koja prikazuje snimku oštećenja s i bez korištenja rasvjete. Video snimak misija moguće je vidjeti na linkovima [26] i [27]. Slika (7.3) prikazuje plan misija za rješavanje prvog i drugog ispitnog zadatka, a slika (7.4) laboratorij za vrijeme ispitivanja.



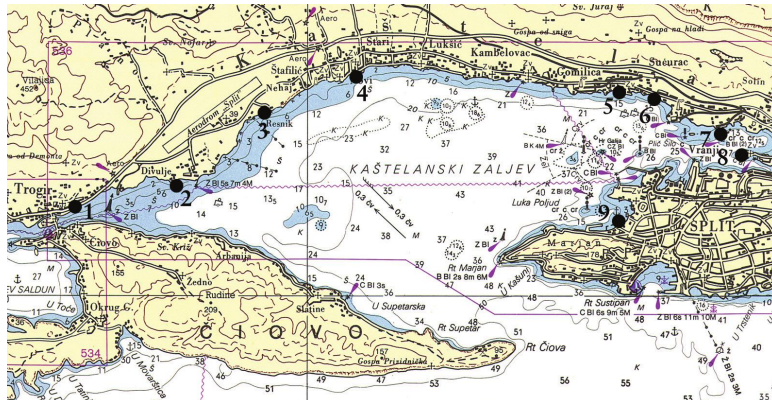
Slika 7.3: Plan putanja ispitnih zadataka



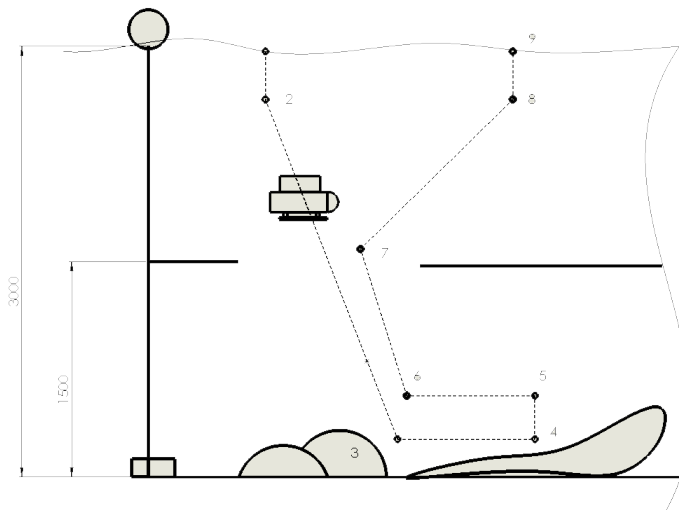
Slika 7.4: Radna atmosfera za vrijeme ispitivanja

7.2 Ispitivanje u moru

Nakon što je prvo ispitivanje definiralo ponašanje podvodnog vozila pod vodom sljedeći zadatak je bio ispitati ponašanje istog u agresivnijoj sredini - morskoj vodi gdje se, za razliku od prethodnog medija (obične vode), pojavljuju uvjeti intenzivnije korozije, smanjene vidljivosti, veće gustoće fluida te poremećaja u obliku morskih struja i valova. Ovo ispitno ronjenje obavljeno je na podmorskom arheološkom nalazištu Trstenik u Kaštel Sućurcu (7.5) gdje je bilo potrebno nadgledati ronioce koji su mamut pumpama skidali mulj s ostataka broda iz I st.pr.Krista.

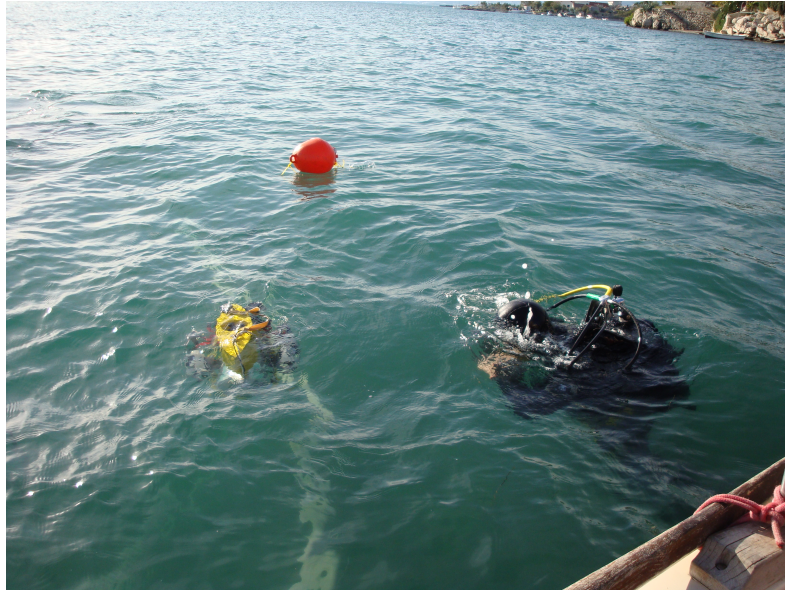


Slika 7.5: Antičko nalazište Trstenik u Kaštelanskom zaljevu - broj 5 [14]



Slika 7.6: Plan kretanja podvodnog vozila

Dakle, misija se svela na zaron podvodnog vozila na dubinu od 3 m izbjegavajući prepreku (ogradu), nadgledanje rada ronioca te vraćanje na površinu ponovo zaobilazeći prepreku (7.6). Nakon uspješnog zarona uz početne poremećaje manjih valova (7.7) pilot je uočio na kameri prepreku (7.8) koju je bez većih poteškoća zaobišao kako bi se spustio do željene dubine od 3 m.



Slika 7.7: *Valovi prije samog zarona*



Slika 7.8: *Upravljanje podvodnim vozilom*

Zatim je kratkim horizontalnim manevrom (0.5 m) došao do mjesta gdje su se nalazili ronjoci koji su mamut pumpama skupljali mulj s rebara antičkog broda (7.9). Tamo se podvodno vozilo zadržalo 5 minuta pokušavajući održati trenutnu dubinu i reducirati pomicanje u horizontalnoj ravnini kako bi snimanje rada ronjoca bilo što kvalitetnije. S obzirom na prije navedene poremećaje video zapis je bio lošiji od onog snimljenog u bazenu (običnoj vodi), ali još uvijek dovoljno kvalitetan za jasno raspoznavanje bitnih stavki rada ronjoca. Po završetku snimanja pilot je podvodno vozilo vratio gotovo istim putem na površinu.



Slika 7.9: *Otklanjanje mulja s arheoloških ostataka*[14]

8 Zaključak

U ovom je radu opisana konstrukcija modela podmornice popularnog naziva ROV što je engleska kratica za daljinski upravljano podvodno vozilo. Trup modela konstruiran je korištenjem CAD alata unutar kojih je simulirano ponašanje konstrukcije pod utjecajem opterećenja uzrokovanih zaronom. Rezultati simulacije pokazali su da maksimalna opreativna dubina iznosi 20 m što je dovoljno za edukacijske svrhe. Propulzijski sustav izrađen je korištenjem kaljužnih brodskih pumpi što se pokazalo kao dobro zbog njihovih karakteristika. Rasvjetni sustav također je projektiran te se pokazao od velike važnosti pri podvodnom snimanju. Kamera za prijenos video signala smještena je na pomično postolje što omogućava pregledavanje dna bez dodatnog zakretanja trupa podvodnog vozila. Nadalje su prikazane osnovne jednadžbe matematičkog modela, uspješno je projektiran i izrađen upravljački modul te korisničko grafičko sučelje. Bez profesionalne pomoći i većih problema, a uz znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te kroz rad na projektima Udruge mehatroničara, izrađeni su i ispitani elektronički sklopovi. Rad cijelog sustava te njegova uporaba prilikom inspekcije oštećenja metalnih konstrukcija ispitana je kroz dva pokusa. Oba pokusa pokazala su zadovoljavajuću funkcionalnost sustava u uvjetima ispitnog bazena zbog toga što su pokusni piloti riješili sve zadatke u maksimalnom vremenskom intervalu od 10 minuta. Iz drugog pokusnog ronjenja obavljenog na arheološkom lokalitetu Kaštel Sućurac može se zaključiti da se sustav zadovoljavajuće ponaša i u morskim uvjetima na malim dubinama za lijepa vremena. Za rad na većim dubinama potrebna su unaprijeđenja na području propulzijskog sustava te ojačanja mehaničke konstrukcije trupa. Prilikom izrade ovog rada stekla su se nova saznanja iz područja konstruiranja, elektronike, upravljanja, programiranja te statike i kinetike krutog tijela u fluidu što upućuje na to da je ovaj rad dodirnuo sva područja mehatronike. Iako se, na prvi pogled, dosta toga obradilo, još je mnogo prostora za nadogradnju i istraživanje. Naime, sljedeći je korak dodavanje stupnjeva autonomnosti, tj. osposobljavanje podvodnog vozila da sam obavi neke lakše zadatke. Nakon toga bi se moglo pokušati dodati alat koji bi obavljao neku funkciju. Na modelu podvodnog vozila, studenti izvode eksperimente i optimiraju ga te tako stiču praktična znanja koja ne dobivaju tijekom redovne nastave na fakultetu. Izlažući ga na sajmovima i raznim izložbama ovaj projekt služi i u svrhu promoviranja Fakulteta strojarstva i brodogradnje ali i mehatronike u globalu.

A Programski kod u mikrokontroleru

```
1 #define A1 PORTD.F7
2 #define B1 PORTD.F6
3 #define A2 PORTD.F5
4 #define B2 PORTD.F4
5 #define A3 PORTD.F3
6 #define B3 PORTD.F2
7 // #define PWM1 PORTB.F1
8 // #define PWM3 PORTB.F2
9 // #define PWM2 PORTB.F3
10 #define LED PORTC.F1
11 #define servo PORTC.F2
12
13 #define offset_senzora 684 // dubina
14 #define MG_poc 0 // motor gornji Pocetna vrijednost da ROV
    miruje
15 #define Kp 20 // pojač P regulatora
16 #define servotimemax 110 // broj položaja servo kamere DOLE 100 ->
    dole do kraja
17 #define servotimemin 15 // položaj servo kamere GORE 0 -> ide do
    vrha
18 #define offset_sredine 0 // offset sredine kamere
19
20 #include <built_in.h>
21
22 // barometar PORTC.F0
23 // servo 1 PORTC.F1
24 // servo 2 PORTC.F2
25
26 unsigned char i, counter, servocnt, s, menu, refdub;
27 unsigned int servotime, pom, dubina, PWM1, PWM2, PWM3;
28 signed int e;
```

```

29
30 void Timer0Overflow_ISR() org IVT_ADDR_TIMER0_OVF //ulaz svakih 20ms
31 {
32     if (counter >=5) //pozicioniranje kamere
33     { servo=1;
34         Delay_us(900); // nuliranje
35         for(servocnt=1; servocnt<=servotime; servocnt++)
36             { Delay_us(11); } //increment pomaka motora
37
38         servo=0;
39         counter = 0; // reset counter
40     }
41     counter++; // increment counter
42     TCNT0=6;
43 }
44
45 unsigned char motor (unsigned char *smjer) //funkcija koja pogoni motor
    na neku brzinu
46 { unsigned char PWM;
47     unsigned int pom;
48
49     while (UART1_Data_Ready()==0);
50     PWM=UART1_Read();
51     if ((PWM>=0)&&(PWM<=100)) //PWM motor naprijed
52         { pom=(PWM*255)/100;
53             *smjer=1;
54         }
55     else
56     if ((PWM>100)&&(PWM<=200)) //PWM motor nazad
57         { pom=((PWM-100)*255)/100;
58             *smjer=0;
59         }
60     else pom=PWM;
61     if (pom>255) pom=255;
62     return pom;
63 }

```

```
64
65 void zaranja()
66 { A3=1; B3=0;
67 }
68
69 void izranja()
70 { A3=0; B3=1;
71 }
72
73 void main()
74 {
75
76 DDRB=0xFF; // set PORTB as output
77 DDRD=0xFF; // set PORTD as output
78 DDRC=0xFF; // set PORTC as output
79 DDC0_bit = 0; //set PORTC.F0 as input - barometar
80
81 A1=1; B1=0; //PWM1 - Lijevi - TIMER1_CH_A
82 A2=1; B2=0; //PWM2 - Desni - TIMER1_CH_B
83 A3=1; B3=0; //PWM3 - Gornji
84
85 //A1=1; B1=0; - ide naprijed
86 //A1=0; B1=1; - ide nazad
87
88 //A3=1; B3=0; - vozi dole
89 //A3=0; B3=1; - vozi gore
90
91 TCNT0=6; //registar timera 0
92 SREG_I_bit = 1; // Interrupt enable
93 TOIE0_bit = 1; // Timer0 overflow interrupt enable
94 TCCR0 =4; // Start timer with 256 prescaler
95
96 UART1_Init(2400); //Inicijalizacija komunikacije
97
98 PWM2_Init(_PWM2_FAST_MODE, _PWM2_PRESCALER_1024, _PWM2_NON_INVERTED, 0)
    ; // PWM3
```

```

99 PWM16bit_Init(_PWM16_FAST_MODE_8BIT, _PWM16_PRESCALER_16bit_1024,
    _PWM16_NON_INVERTED, 255, 1); //PWM1 i PWM2
100
101
102 PWM2_Start();
103
104 PWM2_Set_Duty(0);
105 PWM16bit_Change_Duty(0, _TIMER1_CH_A);
106 PWM16bit_Change_Duty(0, _TIMER1_CH_B);
107 dubina=offset_senzora;
108 servotime=servotimemax/2 - offset_sredine;
109
110 while (1)
111 {
112     while (UART1_Data_Ready()==0);
113     i=UART1_Read();
114
115     if (i==250) //lijevi motor
116     { PWM1=motor(&s);
117         if (s==1) { A1=1; B1=0;} else { A1=0; B1=1;}
118         PWM16bit_Change_Duty(PWM1, _TIMER1_CH_A);
119     }
120     else if (i==251) //desni motor
121     { PWM2=motor(&s);
122         if (s==1) { A2=1; B2=0;} else { A2=0; B2=1;}
123         PWM16bit_Change_Duty(PWM2, _TIMER1_CH_B);
124     }
125     else if (i==252) //diranje joysticka - ronjenje/izranjanje
        upravljano
126     { PWM3=motor(&s);
127         if (s==1) //zaranja
128         { zaranja();
129             PWM3=PWM3+MG_poc;
130             if (PWM3>255) PWM3=255;
131             PWM2_Set_Duty(PWM3);
132         }

```

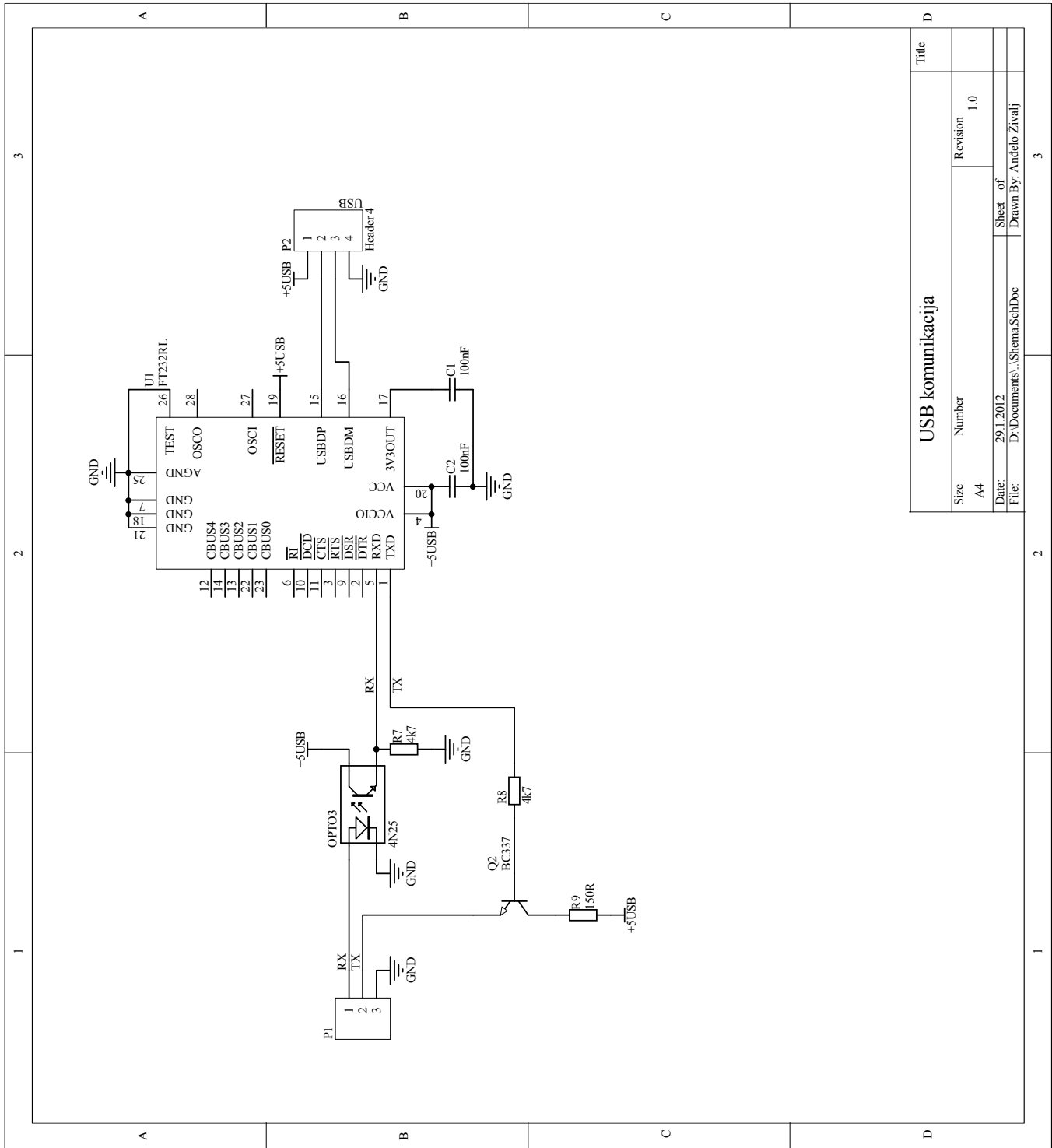
```

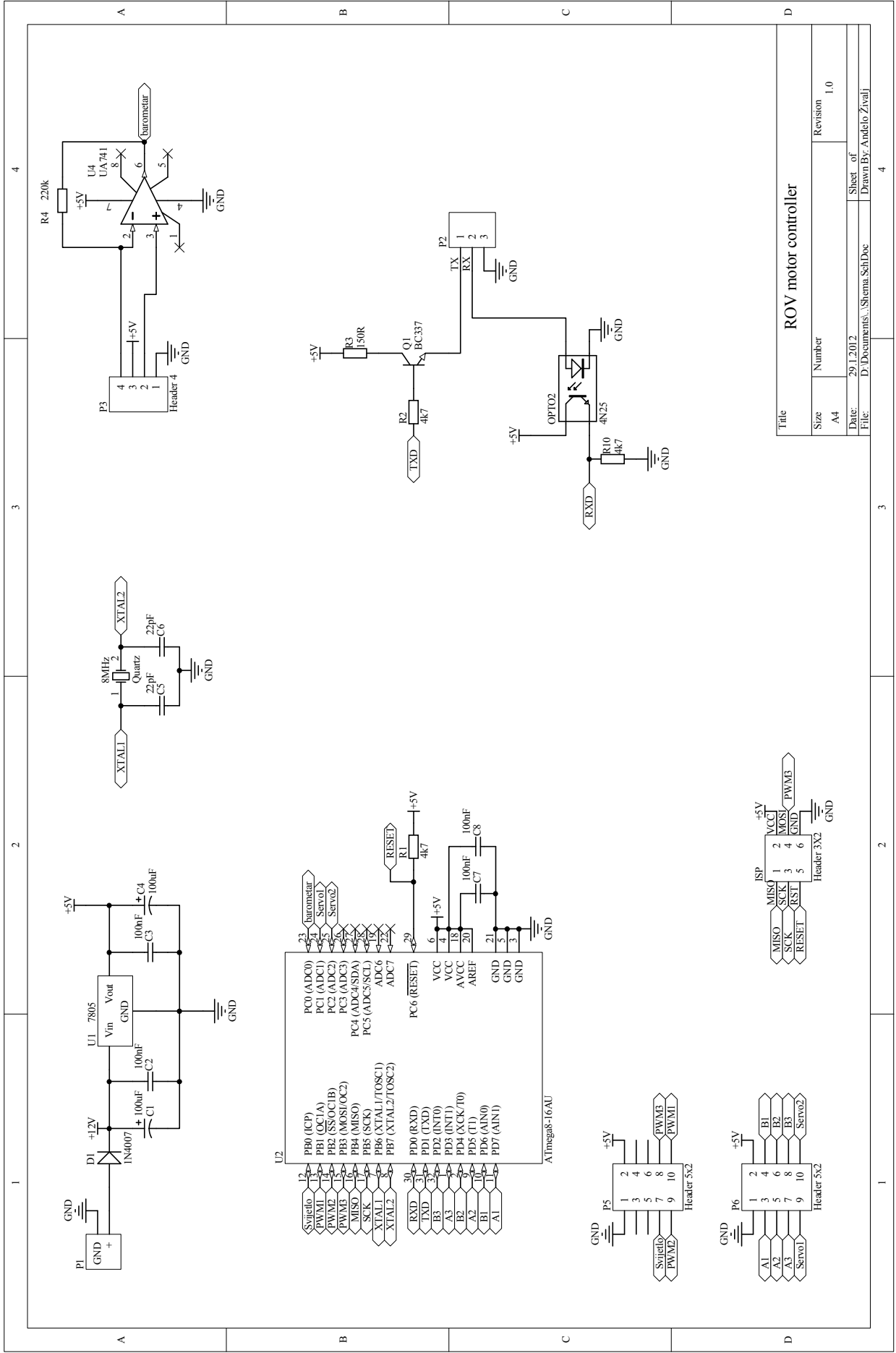
133     else           //izranja
134         { izranja ();
135             if (MG_poc>PWM3) {PWM3=0; goto next;}
136             PWM3=PWM3-MG_poc;
137 next:   PWM2_Set_Duty(PWM3);
138         }
139     }
140 else if (i==253) //ne dira se joystick -> regulacija
141     { while (UART1_Data_Ready()==0);
142         refdub=UART1_Read();
143         e=dubina-refdub;
144         if (e<=0) //zaranja
145             { e=e*(-1);
146                 PWM3=Kp*e;
147                 PWM3=PWM3+MG_poc;
148                 if (PWM3>255) PWM3=255;
149                 zaranja ();
150                 PWM2_Set_Duty(PWM3);
151             }
152     else
153         { PWM3=Kp*e; //izranja
154             PWM3=PWM3-MG_poc;
155             if (PWM3>255) PWM3=255;
156             izranja ();
157             PWM2_Set_Duty(PWM3);
158         }
159     }
160 else if (i==254) //Paljenje svijetla
161     { while (UART1_Data_Ready()==0);
162         LED=UART1_Read();
163     }
164 }
165 else if (i==249) //micanje kamere
166     { while (UART1_Data_Ready()==0);
167         servotime=UART1_Read()+10;
168         if (servotime>servotimemax) servotime=servotimemax;

```

```
169         if (servotime<servotimemin) servotime=servotimemin;
170
171     }
172
173
174 } //kraj while-a
175 } //kraj main-a
```

B Elektroničke sheme projektiranih sklopova





Title		
Size	Number	Revision
A4		1.0
Date:	29.1.2012	
File:	D:\Documents\1_Schema_SchDec	

ROV motor controller		
Size	Number	Revision
A4		1.0
Date:	29.1.2012	
File:	D:\Documents\1_Schema_SchDec	

4

3

2

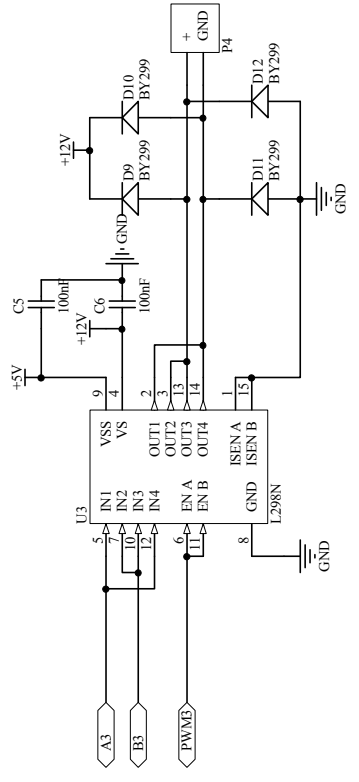
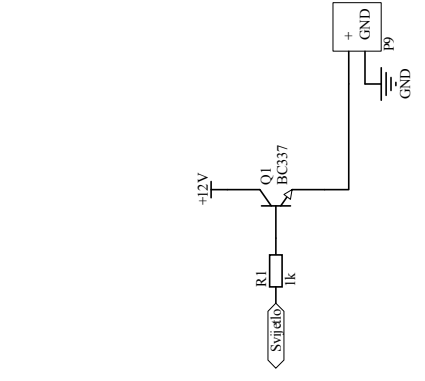
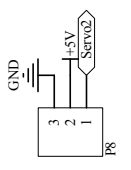
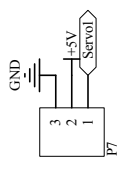
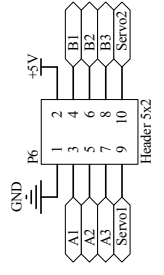
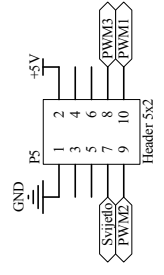
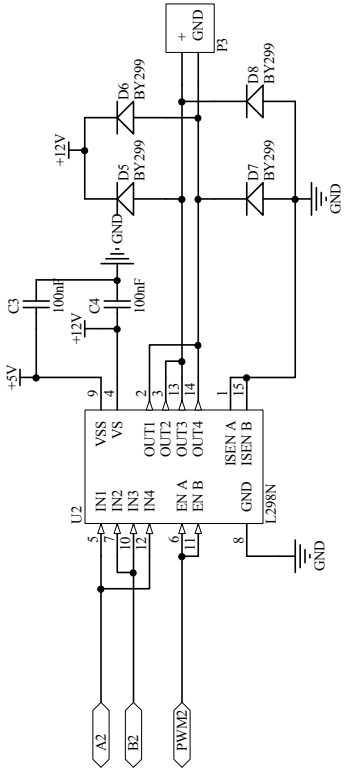
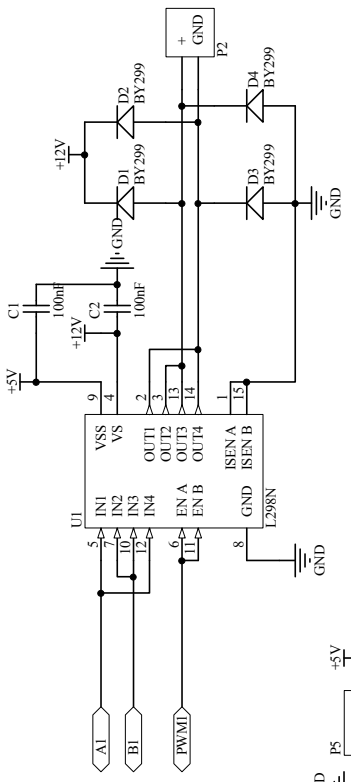
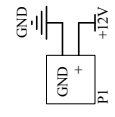
1

A

B

C

D



ROV motor driver

Title		Revision	
Size	Number	Revision	
A4	A4	1.0	
Date:	29.1.2012	Sheet of	
File:	D:\Documents\1\Schem_SehDec	Drawn By: Andalejo Zivaji	

4

3

2

1

A

B

C

D

C Sklopni crtež

Zahvala

Ovom prilikom bismo se zahvalili svom mentoru prof. dr. sc. Mladenu Crnekoviću na odličnoj suradnji i bezrezervnoj pomoći, zatim kolegama Damiru Sušecu, Milanu Markoviću, Viktoru Mandiću i Tomislavu Horvatu na savjetima i pomoći pri izradi podvodnog vozila kao i gospodi Damjanu Pelcu i Zvonku Grgecu na stručnoj pomoći. Još bismo se zahvalili djelatnicima Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije pri Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu na ustupljenom bazenu gdje se obavilo prvo ispitivanje rada podvodnog vozila te doc. dr. sc. Ireni Radić Rossi sa Odjela za arheologiju Sveučilišta u Zadru na suradnji i pomoći pri drugom ispitivanju u morskim uvjetima.

Literatura

- [1] http://www.soulwork.net/projects/rov__podvodna_vozila.html, 03.05.2013.
- [2] http://www.rhinopolymers.com/plexiglas_brochures/PLEXIGLAS-XT-Basic-grades.pdf, 03.05.2013.
- [3] R. L. W. S. Robert D. Christ, *The ROV Manual: A User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles*. 2007.
- [4] W. Wang, "Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV". 2006.
- [5] http://www.hobbydirekt.de/product_info.php?language=de&products_id=2361, 03.05.2013.
- [6] http://cbcdn1.gp-static.com/uploads/product_manual/file/34/HD-HERO-UM-ENG-110110.pdf, 03.05.2013.
- [7] http://www.jewo.de/images/stories/produkte/datenblaetter/fiamm_gs/FG20721_20722.pdf, 03.05.2013.
- [8] http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf, 03.05.2013.
- [9] http://www.atmel.com/Images/Atmel-8159-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8A_datasheet.pdf, 03.05.2013.
- [10] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/98054/MOTOROLA/MPX2202.html>, 03.05.2013.
- [11] Mikroelektronika, "MikroC PRO for PIC". 2009.
- [12] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000240.pdf>, 03.05.2013.
- [13] http://www.electronicandyou.com/Electronic-Machine-Tools/electronic_pcb_assembly_machines_tools.html, 03.05.2013.

- [14] I. R. Rossi, *"Arheološka baština u podmorju Kaštelanskog zaljeva"*. 2008.
- [15] http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:JPyIksT90jUJ:www.ss-tehnicka-rboskovic-zg.skole.hr/skola/djelatnici/zoran_mutak%3Fdm_document_id%3D430%26dm_dnl%3D1+&cd=1&hl=hr&ct=clnk&gl=hr, 03.05.2013.
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Remotely_operated_underwater_vehicle, 03.05.2013.
- [17] <http://www.udrugamehatronicara.hr>, 03.05.2013.
- [18] http://www.aero.polimi.it/~lanz/bacheca/downloads/cost/aa10_11/MD_Nastran_Elements_4.pdf, 03.05.2013.
- [19] M. Lukas, *"Seminarski rad : Strukturna analiza konstrukcije nosila UT2000"*. 2013.
- [20] <http://www.plexyglass.net>, 03.05.2013.
- [21] http://www.engineeringtoolbox.com/ip-ingress-protection-d_452.html, 03.05.2013.
- [22] J. B. S. Rui M. F. Gomes and F. L. Pereira, *"Modeling and Control of the IES PROJECT ROV"*. 2003.
- [23] J. Kasać, *"Opća teorija sustava: Materijali za predavanja i vježbe"*. 2007.
- [24] <http://highlight.gmc.globalmarket.com/products/details/high-power-led-diode-1w-led-light-source-for-spot-lighting-008-1415884.html>, 03.05.2013.
- [25] M. Crneković, *"Predavanja iz kolegija Mikroprocesorsko upravljanje"*. 2010.
- [26] <http://www.youtube.com/watch?v=zQqdCwmQRBI>, 03.05.2013.
- [27] <http://www.youtube.com/watch?v=P-4YQsgdjzA>, 03.05.2013.

Sažetak

Anđelo Živalj, Marin Lukas

Konstrukcija i vođenje daljinski upravljano podvodnog vozila

Zbog mogućnosti pristupa čovjeku nedostupnih predjela, podmornica je od samih početaka njezine ideje bila atraktivno istraživačko sredstvo. Razvoj elektronike i tehnike općenito omogućio je ubrzani napredak na području podvodne mobilne robotike kako za vojne i istraživačke tako i za edukacijske svrhe. U ovom radu detaljno je opisana mehanička konstrukcija edukacijskog daljinski upravljano podvodnog vozila, izvršeni su proračuni maksimalne operativne dubine te je, sukladno tome, odabran odgovarajući materijal kao i tehnologija izrade. Osnova propulzijskog sustava podvodnog vozila je standardna kaljužna pumpa odabrana s ciljem smanjenja cijene istog bez značajnog pada kvalitete. Za komunikaciju s površinom korišten je standardni UTP kabel te RS232 veza zbog već navedenih razloga. Zatim je postavljen matematički model cijelog sustava pomoću kojega su simulirano ponašanje ronilice za vrijeme osnovnih manevara te je raspisan linearizirani model sustava u prostoru stanja što je dobra podloga za razvijajne regulacijskih algoritama i sustava automatskog upravljanja. Isto tako razvijeni su svi potrebni elektronički sklopovi za upravljanje propulzijom, osvjetljenjem i kamerom na podvodnom vozilu kao i korisničko grafičko sučelje za upravljanje. Čitav sustav napaja se iz akumulatora što je vrlo pogodno za rad na terenu. Na kraju je obavljeno ispitivanje rada razvijenog prototipa u realnim uvjetima u bazenu Laboratorija za podvodne sustave i tehnologije pri Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Ključne riječi: daljinski upravljano podvodno vozilo, mehanička konstrukcija, elektronički upravljački sustav, grafičko korisničko sučelje

Summary

Anđelo Živalj, Marin Lukas

Design and control of remote operated underwater vehicle

Because of access to areas inaccessible to man, the submarine from the very beginning of her ideas was an attractive research tool. The development of electronics and technology in general has enabled rapid progress in the field of underwater mobile robotics for military and research as good as for educational purposes. In this paper the mechanical design of the educational remotely operated underwater vehicle was detailed. Also, maximum operating depth was calculated and, consequently, the proprious material and manufacturing technology were chosen. Basis of the propulsion system of underwater vehicle is a standard bilge pump selected to reduce whole system price without a significant quality drop. To communicate with the surface a standard UTP cable and RS232 connection were used for the reasons mentioned above. Then a system mathematical model was developed to the simulate behavior of the ROV during basic maneuvers and linearized state space model of the system was derived which is a good basis for development of a control algorithms for automatic operation. All necessary vehicle propulsion control, lighting and camera movement electronic circuits were developed just as graphical user interface for ROV control. The entire system is powered from the battery increasing versatility. In the end, operation of the developed prototype was tested in the pool at Laboratory for underwater systems and technology at the Faculty of electrical engineering and computing in Zagreb.

Keywords: remotely operated underwater vehicle, mechanical design, electronic control system, user graphical interface

Životopis

Andelo Živalj

Andelo Živalj je rođen 02.08.1989. u Splitu gdje završava formalno obrazovanje u Osnovnoj školi "Brda" 2004. godine. Iste godine upisuje se u Tehničku školu Split, smjer Tehničar za mehatroniku. Za vrijeme školovanja svira gitaru u KUD-u "Jedinstvo" u Splitu te aktivno trenira i igra rugby za RK NADA iz Splita te za hrvatsku rugby reprezentaciju s kojom osvaja prvo mjesto na Europskom prvenstvu za igrače do 20 godina. Iste godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a na drugoj godini se odlučuje na smjer Mehatronika i robotika. Jedan je od osnivača Udruge mehatroničara - studentska udruga koja djeluje pri spomenutom visokom učilištu. U najkraćem roku završava studij s prosječkom ocjena 3,683 i ostvarenih 210 ECTS bodova. Voditelj je projekata "Daljinski upravljano podvodno vozilo - *Nautilusum*" i "ZVZ - Zemlja-voda-zrak". Godine 2012. upisuje sveučilišni diplomski studij Strojarsstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, smjer Mehatronika i robotika. Trenutačno radi na projektu "Elektrana na morske valove" u sklopu Kreativnog centra mladih u Zagrebu.

Marin Lukas

Marin Lukas rođen je 18.01.1989. u Zagrebu gdje je završio Osnovnu školu Jabukovac - Zagreb 2003. godine te paralelno Osnovnu glazbenu školu Blagoje Bersa u Zagrebu. Nakon toga upisuje V gimnaziju u Zagrebu koju završava 2007. godine. Tijekom pohađanja gimnazije bavi se fizikom u grupi prof. Darija Mičića te odlazi na međunarodna natjecanja IYPT (International Young Physicist Tournament) gdje 2006. u Bratislavi osvaja prvo mjesto. Po završetku srednje škole obrazovanje nastavlja na sveučilišnom preddiplomskom studiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu gdje 2008. upisuje smjer Mehatronika i robotika. Godine 2013. završava preddiplomski studij s prosjekom ocjena 3,75 te ostvarenih 210 ECTS bodova. Tijekom studija aktivan je u udrugama ICM - Istraživački centar mladih i Udruzi mehatroničara, te je nekoliko godina vodio projekte u sklopu znanstveno-edukacijskog centra Višnjan. U slobodno vrijeme bavi se alpinizmom, speleologijom, jedrenjem te je član HGSS - Hrvatske gorske službe spašavanja gdje je 2010. stekao Naslov gorski spašavatelj. Trenutno studira na diplomskom studiju na istom visokom učilištu.