

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dalibor Žgela**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum dipl. ing.

Student:

Dalibor Žgela

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Željku Šitumu.

Dalibor Žgela



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DALIBOR ŽGELA** Mat. br.: **0035194883**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Automatizirano upravljanje elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Automated control of an electro-hydraulic robotic manipulator**

Opis zadatka:

Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM), razvijen u Laboratoriju za automatiku i robotiku ima tri stupnja slobode gibanja (sferna struktura ruke robota, RRT – rotacija postolja, rotacija ruke, translacija konzole ruke) s hidraulički aktuiranom prihvatnicom. Manipulatorom je moguće upravljati ručno koristeći upravljačku ručicu (joystick) i bežično koristeći mobilnu aplikaciju kojom se upravljački signali šalju na međusklop koji sadrži Arduino mikrokontroler, a koji upravlja protokom fluida u ventilskom bloku. Daljnji razvoj sustava upravljanja usmjeren je ka automatiziranom djelovanju manipulatora i upravljanju orijentiranom ka izvršenju zadatka. Za mjerenje gibanja upravljanih koordinata u prostoru manipulator je opremljen sensorima.

U radu je potrebno:

- kratko opisati način djelovanja elektrohidrauličkog robotskog manipulatora,
- definirati radni prostor manipulatora povezan s mjerenim veličinama na sensorima,
- izraditi mobilnu aplikaciju za automatizirano upravljanje gibanjem manipulatora u radnom prostoru s mogućnošću preprogramiranja zadatka i objasniti korisničko sučelje aplikacije,
- izraditi simulacijski model individualnih stupnjeva slobode gibanja manipulatora te prikazati simulacijske rezultate za osmišljeni način upravljanja,
- demonstrirati eksperimentalni način rada manipulatora s predloženim rješenjem.

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

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.

Rok predaje rada:

29. studenog 2018.

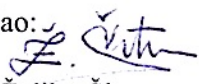
Predviđeni datum obrane:

05. prosinca 2018.

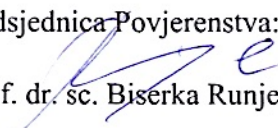
06. prosinca 2018.

07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

  
prof. dr. sc. Željko Šitum

Predsjednica Povjerenstva:

  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD .....	1
2. OPIS SUSTAVA EHRM-a .....	3
2.1. Upravljački sustav .....	3
2.1.1. Razvodni ventil .....	3
2.1.2. Upravljački ormar i upravljačka kutija .....	7
2.1.3. Konverzijska pločica .....	9
2.1.4. Arduino mikrokontroler u funkciji bežične komunikacije .....	11
2.2. Mjerni dio sustava .....	12
2.2.1. Mjerenje kuta zakreta .....	12
2.2.1.1. Mjerenje kuta zakreta prvog stupnja slobode gibanja .....	14
2.2.1.2. Mjerenje kuta zakreta drugog stupnja slobode gibanja .....	18
2.2.1.3. Mjerenje translacije .....	19
2.3. Sigurnosni dio sustava .....	22
3. IZRADA UPRAVLJAČKE APLIKACIJE .....	23
3.1. Zahtjevi na upravljačku aplikaciju .....	23
3.2. Programiranje aplikacije EHRM PRO .....	24
3.2.1. Problem dvostrane komunikacije .....	25
3.2.2. Problem ispravnog prijema podataka mikrokontrolera .....	27
3.3. Upravljanje aplikacijom .....	28
3.3.1. Prikaz Ručno upravljanje .....	29
3.3.2. Prikaz Automatsko upravljanje .....	32
3.3.3. Prijenos podataka Bluetooth vezom .....	36
3.3. Programiranje Arduino mikrokontrolera .....	37
4. SIMULACIJSKI MODEL EHRM-a .....	39
4.1. Odabir prikladnog regulatora EHRM-a .....	39
4.2. Primarni podsustav simulacijskog modela EHRM-a .....	45
4.2.1. Podsustav prvog stupnja slobode gibanja .....	46

---

4.2.2. Podsustav drugog stupnja slobode gibanja .....	49
4.2.3. Podsustav trećeg stupnja slobode gibanja.....	52
4.2.4. Podsustav hidraulički aktuirane prihvatnice .....	55
4.3. Rezultati simulacija.....	58
4.3.1. Prvi stupanj slobode gibanja .....	58
4.3.2. Drugi stupanj slobode gibanja .....	61
4.3.3. Treći stupanj slobode gibanja .....	65
4.3.4. Gibanje prihvatnice.....	68
5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI .....	70
5.1. Režim velikih signala reference.....	70
5.2. Režim malih signala reference.....	71
6. ZAKLJUČAK.....	74
LITERATURA .....	75
PRILOZI .....	76

## POPIS SLIKA

Slika 1. Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM) [1] .....	1
Slika 2. Proporcionalni ventilski blok s označenim segmentima .....	3
Slika 3. Naponska karakteristika ventila [2] .....	4
Slika 4. Karakteristika proporcionalnog ventilskog bloka određenog digitalizacijom naponske karakteristike ventila prikazane na slici 3. ....	5
Slika 5. Ovisnost protoka fluida o naponu upravljačkog signala na ventilima tri stupnja slobode gibanja .....	6
Slika 6. Samostalno izrađeni upravljački sustav EHROM-a .....	8
Slika 7. Prikaz unutrašnjosti upravljačkog ormara .....	8
Slika 8. Konverzijska pločica povezana s Arduino mikrokontrolerom [1] .....	9
Slika 9. Mape ovisnosti vrijednosti napona na izlazu konverzijske pločice u ovisnosti o vrijednosti upravljačke varijable od strane tablet uređaja.....	11
Slika 10. Arduino Mega 2560 mikrokontroler [3].....	12
Slika 11. HM-10 Bluetooth modul s poveznim pinovima prikladnima za Arduino mikrokontroler [4].....	12
Slika 12. Prikaz izlaznog signala rotacijskog davača u ovisnosti o kutu s mjernim područjem označenim oznakom $\varphi_{FS}$ [5].....	13
Slika 13. Rotacijski davač kuta zakreta postolja manipulatora.....	14
Slika 14. Magnetski aktuator beskontaktnog rotacijskog davača kuta zakreta postolja .....	15
Slika 15. Skica predloženog naponskog djelila za akviziciju mjernog signala enkodera prvog stupnja slobode gibanja.....	16
Slika 16. Rotacijski davač kuta zakreta ruke manipulatora .....	18
Slika 17. Linearni potenciometar s djelomično izvučenom poteznom niti.....	19
Slika 18. Skica predloženog naponskog djelila za akviziciju mjernog signala potenciometra translacijskog člana.....	20
Slika 19. Schmersal prekidač graničnih položaja .....	22
Slika 20. Primjer zaslona za zadavanje upravljačkih varijabli postojeće upravljačke aplikacije EHROM na mobilnom uređaju iPhone .....	23
Slika 21. Razvojno sučelje Xcode 9.3 programskog paketa .....	24
Slika 22. Zaslون dobrodošlice aplikacije EHROM.....	28
Slika 23. Prikaz glavnog izbornika aplikacije EHROM PRO .....	29

Slika 24. Prikaz ručnog upravljanja aplikacije EHROM PRO .....	29
Slika 25. Zaslona povezivanja Bluetooth vezom aplikacije EHROM PRO .....	30
Slika 26. Programski prozor za unos imena pri zahtjevu za spremanjem određene točke ....	31
Slika 27. Prikaz zaslona automatskog upravljanja aplikacije EHROM PRO .....	32
Slika 28. Prikaz tablice točaka prilikom pritiska tipke <i>Uredi</i> .....	33
Slika 29. Prikaz tablice točaka prilikom duljeg pritiska određenog retka tablice.....	33
Slika 30. Prikaz tablice točaka nakon dupliciranja točke i njenog premještanja na željenu poziciju u tablici.....	33
Slika 31. Obavijest aplikacije da uređivanje točaka nije moguće ako je tablica točaka zaključana .....	34
Slika 32. Obavijest aplikacije da manipulator, prilikom pokretanja automatskog upravljanja, nije na poziciji prve točke .....	34
Slika 33. Prikaz mjernih veličina na dinamičkim dijagramima tijekom testiranja funkcionalnosti aplikacije .....	35
Slika 34. Simulacijski model elektrohidrauličkog robotskog manipulatora .....	39
Slika 35. Prikaz funkcije $-\tanh(e)$ i $-\tanh(0,1e)$ na intervalu $[-20,20]$ .....	40
Slika 36. Simulacijski model predloženog regulatora prikazanog za primjer prvog stupnja slobode gibanja manipulatora .....	43
Slika 37. Primarni podsustav simulacijskog modela EHROM-a.....	45
Slika 38. Simulacijski model prvog stupnja slobode gibanja manipulatora, rotacije postolja .....	48
Slika 39. Skica izmjerenih geometrijskih odnosa podiznog cilindra i osi rotacije ruke s translacijskim članom .....	50
Slika 40. Simulacijski model aktuatora drugog stupnja slobode gibanja manipulatora, dvoradnog cilindra za rotaciju ruke .....	51
Slika 41. Simulacijski model aktuatora trećeg stupnja slobode gibanja manipulatora, dvoradnog dvostupanjskog teleskopskog cilindra .....	54
Slika 42. Simulacijski model upravljanja cilindrom prihvatnice.....	57
Slika 43. Odziv rotacije postolja na referencu kuta postolja iznosa $270^\circ$ uz primjenu regulatora promijenjenih parametara .....	58
Slika 44. Usporedba protoka hidromotora za skok reference iznosa $270^\circ$ uz primjenu regulatora promijenjenih parametara .....	59



Slika 45. Odziv kuta rotacije postolja na referencu kuta postolja iznosa $5^\circ$ teoretskog regulatora (odziv oznake 1) i realnog regulatora (odziv oznake 2) .....	60
Slika 46. Usporedba protoka hidromotora za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa $5^\circ$ .....	61
Slika 47. Odziv kuta rotacije ruke na referencu kuta rotacije iznosa $74^\circ$ uz primjenu regulatora promijenjenih parametara .....	62
Slika 48. Usporedba protoka podiznog cilindra za skok reference iznosa $74^\circ$ uz primjenu regulatora promijenjenih parametara .....	63
Slika 49. Odziv kuta rotacije ruke na referencu kuta iznosa $5^\circ$ teoretskog regulatora (odziv oznake 1) i realnog regulatora (odziv oznake 2).....	64
Slika 50. Usporedba protoka podiznog cilindra za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa $5^\circ$ .....	64
Slika 51. Odziv duljine teleskopskog cilindra na referencu duljine teleskopskog cilindra iznosa 988 mm uz primjenu regulatora promijenjenih parametara .....	65
Slika 52. Usporedba protoka teleskopskog cilindra za skok reference iznosa 1000 mm uz primjenu regulatora promijenjenih parametara.....	66
Slika 53. Odziv teleskopskog cilindra na referencu duljine cilindra iznosa 5 mm.....	67
Slika 54. Usporedba protoka teleskopskog cilindra za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa 5 mm .....	68
Slika 55. Odzivi gibanja cilindra prihvatnice za iznose upravljačke varijable $u_4=15$ i $u_4=100$ .....	69
Slika 56. Odziv stupnjeva slobode gibanja manipulatora na iznos reference u režimu velikih signala i primjenu izvornih parametara regulatora .....	70
Slika 57. Odziv stupnjeva slobode gibanja manipulatora na iznos reference u režimu malih signala i primjenu izvornih parametara regulatora .....	72

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	Oznaka početka poruke u prijenosu Bluetooth vezom
$A$	-	Parametar regulatora koji određuje ponašanje sustava u blizini referentne točke
$A_1$	mm <sup>2</sup>	Djelujuća površina podiznog cilindra
$A_{21}$	mm <sup>2</sup>	Djelujuća površina prvog stupnja teleskopskog cilindra
$A_{22}$	mm <sup>2</sup>	Djelujuća površina drugog stupnja teleskopskog cilindra
$A_3$	mm <sup>2</sup>	Djelujuća površina cilindra prihvatnice
$a$	mm	Duljina ruke manipulatora između osi rotacije ruke i centra donjeg prihvata podiznog cilindra
$B$	-	Parametar podešenja željene karakteristike početnog odziva sustava
$b$	mm	Duljina ruke manipulatora između osi rotacije ruke i centra gornjeg prihvata podiznog cilindra
$C$	-	Parametar regulatora, početni faktor razlike praćenja
$D_1$	mm	Promjer klipa podiznog cilindra
$D_2$	mm	Promjer klipnjače podiznog cilindra
$D_{11}$	mm	Promjer klipa prvog stupnja translacijskog cilindra
$D_{12}$	mm	Promjer klipnjače prvog stupnja translacijskog cilindra
$D_{21}$	mm	Promjer klipa drugog stupnja translacijskog cilindra
$D_{22}$	mm	Promjer klipnjače drugog stupnja translacijskog cilindra
$D_3$	mm	Promjer klipa cilindra prihvatnice
$D_4$	mm	Promjer klipnjače cilindra prihvatnice
$e$	-	Regulacijska pogreška
$F_r$	-	Ukupno regulacijsko djelovanje
$f_r$	-	Regulacijsko djelovanje pojedinog regulatora
$f$	-	Funkcija simulacijskog modela
$I_{\max}$	mA	Maksimalni iznos struje
$i$	-	Prijenosni omjer pužnog para
$l_1$	mm	Duljina podiznog cilindra
$l_2$	mm	Duljina teleskopskog cilindra
$l_3$	mm	Duljina cilindra prihvatnice
$l_{1,0}$	mm	Početna duljina podiznog cilindra
$l_{2,0}$	mm	Početna duljina teleskopskog cilindra
$l_{3,0}$	mm	Početna duljina cilindra prihvatnice
$l_{1,\max}$	mm	Maksimalni hod podiznog cilindra

$l_{2,max}$	mm	Maksimalni hod translacijskog cilindra
N	-	Oznaka kraja poruke primljene od Arduino mikrokontrolera
$n_m$	1/min	Brzina vrtnje hidromotora
$n_{SSG1}$	1/min	Brzina vrtnje prvog stupnja slobode gibanja
$P$	-	Faktor praćenja regulatora
$Q_{c1}$	L/min	Protok ulja podiznog cilindra
$Q_{c2}$	L/min	Protok ulja teleskopskog cilindra
$Q_{c3}$	L/min	Protok ulja cilindra prihvatnice
$Q_m$	L/min	Protok ulja kroz hidromotor
$R_{min}$	$\Omega$	Minimalni iznos otpora
$R_{1min}$	$\Omega$	Minimalni iznos otpora otpornika oznake 1
$R_{2min}$	$\Omega$	Minimalni iznos otpora otpornika oznake 2
$R_1$	$\Omega$	Otpor otpornika oznake 1
$R_2$	$R_{11}$	Otpor otpornika oznake 2
$R_{11}$	$\Omega$	Otpor otpornika oznake 11
$R_{12}$	$\Omega$	Otpor otpornika oznake 12
$R_{21}$	$\Omega$	Otpor otpornika oznake 21
$R_{22}$	$\Omega$	Otpor otpornika oznake 22
$s$	mm	Duljina cilindra
$T$	s	Vrijeme dostizanja stacionarne vrijednosti
$t$	s	Varijabla vremena
$U_{DC}$	V	Napon napajanja proporcionalnog ventilskog bloka
$U_S$	V	Napon upravljačkog signala proporcionalnog ventilskog bloka
$u$	-	Univerzalna varijabla funkcija u simulacijskom modelu
$u_1$	-	Vrijednost upravljačke varijable prvog stupnja slobode gibanja
$u_2$	-	Vrijednost upravljačke varijable drugog stupnja slobode gibanja
$u_3$	-	Vrijednost upravljačke varijable trećeg stupnja slobode gibanja
$u_4$	-	Vrijednost upravljačke varijable prihvatnice
$V_{A/D}$	-	Iznos napona očitano Arduino mikrokontrolerom
$V_m$	V	Napon mjernog signala
$V_{max}$	V	Maksimalni iznos napona
$V_{m,spec}$	cm <sup>3</sup>	Specifični volumen hidromotora
$V_1$	V	Pad napona na otporniku oznake 1
$V_2$	V	Pad napona na otporniku oznake 2
$V_{11max}$	V	Maksimalni iznos napona

---

$v_{c1}$	mm/s	Brzina klipnjače podiznog cilindra
$v_{c2}$	mm/s	Brzina teleskopskog cilindra
$v_{c3}$	mm/s	Brzina klipnjače cilindra prihvatnice
$Y$	-	Oznaka kraja poruke primljene od tablet uređaja
$\alpha$	-	Trenutna vrijednost regulirane varijable
$\alpha_r$	-	Referentna vrijednost regulatora
$\alpha_0$	°	Početna vrijednost kuta zakreta rotacijskih stupnjeva slobode gibanja
$\alpha_1$	°	Kut zakreta prvog stupnja slobode gibanja
$\alpha_{0,r}$	-	Početna očitana vrijednost regulirane varijable
$\Delta\alpha$	°	Promjena kuta zakreta rotacijskih stupnjeva slobode gibanja
$\Delta l_1$	mm	Promjena duljine podiznog cilindra
$\Delta l_2$	mm	Promjena duljine teleskopskog cilindra
$\Delta l_3$	mm	Promjena duljine cilindra prihvatnice
$\varphi$	°	Kut zakreta rotacijskih stupnjeva slobode gibanja
$\rho$	-	Faktor nezavršenosti gibanja

## SAŽETAK

Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM) predstavlja složen, multivarijabilni sustav s tri stupnja slobode gibanja i hidraulički aktuiranom prihvatnicom, namijenjen manipulaciji predmeta velikih masa do 200 kg. Tri stupnja slobode gibanja čine rotacija postolja, rotacija dijela ruke s translacijskim članom te sama translacija ruke manipulatora, koji su također hidraulički aktuirani. Cilj ovog rada je izraditi upravljački sustav koji će omogućiti pamćenje željenih točaka manipulatora te provođenje automatiziranog gibanja prema njima. Provedena je analiza mjernih komponenti stupnjeva slobode gibanja kojima je manipulator opremljen te je predložen i realiziran način akvizicije vrijednosti senzora. Izrađena je aplikacija za tablet uređaj koja omogućuje bežično upravljanje manipulatorom, memoriranje željenih točaka i njihovih postavki te provođenje automatskog gibanja i praćenje dijagrama stanja senzora. Nadalje, osmišljen je nelinearni regulator primjenjiv za sva tri stupnja slobode gibanja te su provedene simulacije odziva sustava. Na kraju su predstavljeni eksperimentalni rezultati automatiziranog upravljanja sustavom s predloženim regulatorom.

Ključne riječi: robotski manipulator, automatizirano upravljanje, bežično upravljanje tablet uređajem, hidraulika

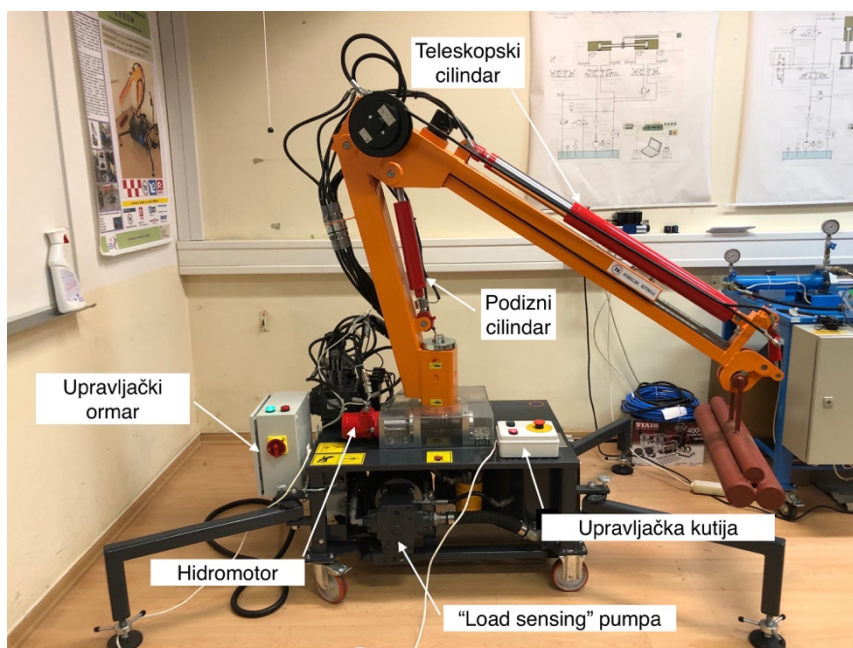
## **SUMMARY**

Electro-hydraulic robotic manipulator (EHROM) represents a complex, multivariable system with three degrees of freedom and hydraulically actuated gripper, designed for manipulation of heavy objects weighing up to 200 kg. Three degrees of freedom are comprised of the rotation of the entire arm, rotation of the extendable arm and the linear movement of the extendable arm. The purpose of this paper is to design a control system that will provide the user with the option to save the desired points of the manipulator and conduct automatized movement of the manipulator accordingly. Analysis of the sensory part of all degrees of freedom of the system has been conducted and a method for the sensor data acquisition has been suggested and implemented. A tablet device app has been designed that enables the operator to wirelessly control the manipulator, save desired points of movement of the manipulator and to conduct the automatic control of the manipulator along with the option of observing the state of the sensors through live diagrams. Furthermore, a nonlinear regulator applicable to all three degrees of freedom has been designed and simulations of the movement of the manipulator were conducted. At the end, experimental results of the accomplished automatized control of the manipulator were presented.

Key words: robotic manipulator, automatized control, wireless control using a tablet, hydraulics

## 1. UVOD

Upravljanje i programiranje industrijskih robota se često može doimati kao neintuitivnim i vrlo složenim čak i za ostvarenje vrlo jednostavnih funkcija kao što su trivijalan "pick and place" zadatak ili zaobilazanje prepreke. Iako se sve više truda posvećuje unošenju inteligencije u robotske sustave, oni će i dalje veliki udio svog rada ostvarivati u upravo prethodno navedenim, monotonim poslovima kojih želimo poštediti ljudsku snagu. Sukladno tome, javlja se potreba za univerzalnim i jednostavnim sučeljem koje bi omogućilo upravljanje i programiranje takvih sustava bez potrebe za skupim i specijalnim obukama. Time bi se robotski sustavi, kao što je elektrohidraulički robotski manipulator (slika 1.), približili i manjim tvrtkama koje nemaju mogućnosti provođenja sveobuhvatne robotizacije svojih sustava, a s ciljem unapređenja njihove proizvodnje.



Slika 1. Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM) [1]

Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM), razvijen u Laboratoriju za automatiku i robotiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje, namijenjen je manipulaciji predmeta velikih masa do 200 kg. Manipulator ima tri stupnja slobode gibanja, rotaciju postolja, rotaciju ruke i translaciju konzole ruke, a na kraju mehaničke strukture manipulatora se nalazi hidraulička prihvatnica. Stupnjevi slobode gibanja su također hidraulički akutirani [1]. Pri tome će se upravo opisani manipulator koristiti kao eksperimentalni sustav za razvoj predloženog sučelja za automatizirano upravljanje manipulatorom.

Trenutno upravljanje navedenih članova manipulatora je moguće putem poluga na proporcionalnom ventilskom bloku, pomoću odvojene upravljačke ručice (joysticka) ili mobilnim uređajem sa zaslonom osjetljivim na dodir putem Bluetooth veze i aplikacije EHROM. No, niti jedna od navedenih metoda pokretanja stupnjeva slobode gibanja manipulatora ne sadrži mogućnost automatiziranog upravljanja.

Cilj ovog rada je stoga unaprijediti mogućnosti bežičnog upravljanja izradom aplikacije za tablet uređaj koja bi, uz postojeće, pružila dodatne mogućnosti automatiziranog upravljanja manipulatorom. S obzirom na navedeni cilj, rad je strukturiran na način da se razvoj sustava za automatsko upravljanje prati od kratke analize sustava manipulatora, kroz izradu aplikacije i simulacijskih modela uz odabir regulatora te konačno praktičnu implementaciju upravljačkog sustava na manipulatoru.

Drugo poglavlje rada donosi kratki opis upravljačkog sustava manipulatora te su prikazane teoretske i eksperimentalno određene mape određivanja izvršnih varijabli stanja aktuatora prema iznosima upravljačkog signala za realne i implementirane komponente te je dana analiza mjernih komponenti stupnjeva slobode gibanja sustava uz prijedlog načina akvizicije mjernog signala odabranim mikrokontrolerom.

Treće poglavlje rada opisuje zahtjeve na upravljačku aplikaciju za automatizirano upravljanje manipulatora te objašnjava korisničko sučelje izrađene aplikacije.

Nadalje, u četvrtom poglavlju se daje uvid u simulacijski model individualnih stupnjeva slobode gibanja manipulatora i simulacijske rezultate uz primjenu predloženog načina upravljanja manipulatorom tijekom automatiziranog upravljanja.

Eksperimentalni rezultati primjene cjelokupnog sustava upravljanja su dani u petom poglavlju, uz smjernice za daljnji razvoj sustava, dok su u zaključku dana konačna zapažanja na temu automatiziranog upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom.



## 2. OPIS SUSTAVA EHROM-a

### 2.1. Upravljački sustav

U nastavku je opisan upravljački sustav manipulatora kojeg čine naponski upravljani proporcionalni ventilski blok (slika 2.) i aksijalno klipna pumpa sa zakretnom pločom s funkcijom određivanja protoka fluida prema trenutnim zahtjevima izvršnih članova ("Load sensing" funkcija) te samostalno izrađeni upravljački ormar i upravljačka kutija (slika 6.). Dodatno, upravljački sustav dopunjuje sigurnosni sustav, korištenjem sklopke graničnih položaja (slika 19.).

#### 2.1.1. Razvodni ventil

Za upravljanje tri stupnja slobode gibanja te radom prihvatnice ugrađen je proporcionalni ventilski blok tvrtke Danfoss oznake PVG32 (slika 2.), čije je upravljanje moguće putem ručica na samom ventilskom bloku, zasebnom upravljačkom palicom ili putem EHROM aplikacije i mobilnog uređaja sa zaslonom osjetljivim na dodir.

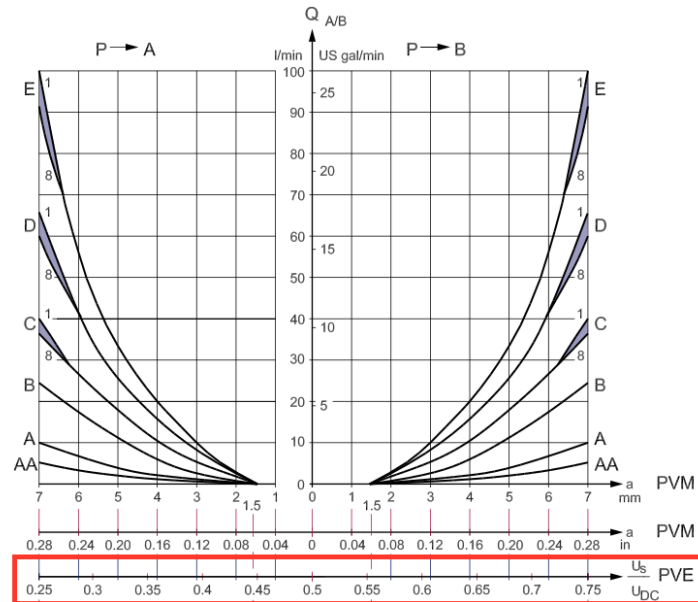


Slika 2. Proporcionalni ventilski blok s označenim segmentima

Odlikuje ga svojstvo neovisnosti protoka fluida o tlaku u segmentu kao i o tlakovima u drugim segmentima razvodnika, izrazito mala histereza te kompaktna konstrukcija. Dozvoljeni radni tlak se kreće u rasponu od 0 do 160 bar, a protok se upravlja naponskim signalom u rasponu od 0 do 24 V DC, pri čemu je neutralni položaj, u kojem je protok fluida zaustavljen, određen pri

12 V. Potpuno otvaranje izlaza se ostvaruje pri 6 V DC naponskog signala dok se potpuno otvaranje komplementarnog izlaza ostvaruje pri 18 V DC [2].

Dijagram ovisnosti protoka ventila o naponu prikazan je na slici 3., a apscisa za ugrađeni blok je označena crvenim pravokutnikom.

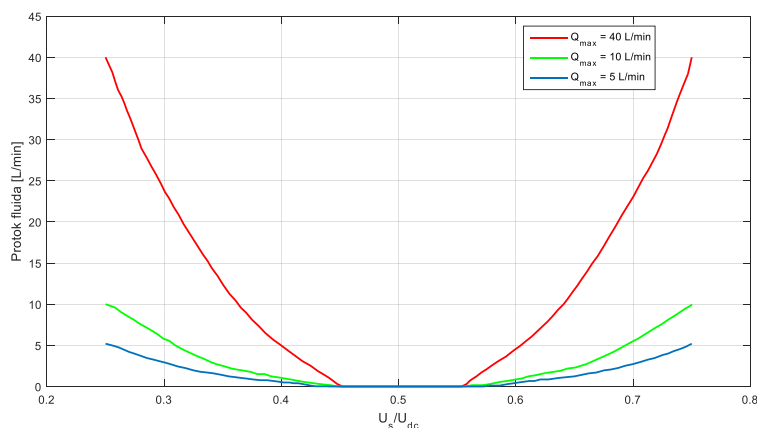


Slika 3. Naponska karakteristika ventila [2]

Pri tome oznaka  $U_{DC}$  na slici 3. označava napon napajanja proporcionalnog ventilskog bloka, a oznaka  $U_s$  napon upravljačkog signala proporcionalnog ventila [2].

Ugrađeni moduli su oznake PVEH te imaju mogućnost upravljanja i putem pulsno-širinske modulacije pri čemu je preporuka da je frekvencija modulacije veća od 1000 Hz [2], čime se simulira konstantan iznos napona koji potom određuje pomak klipa ventila i protok ulja prema danom dijagramu na slici 3.

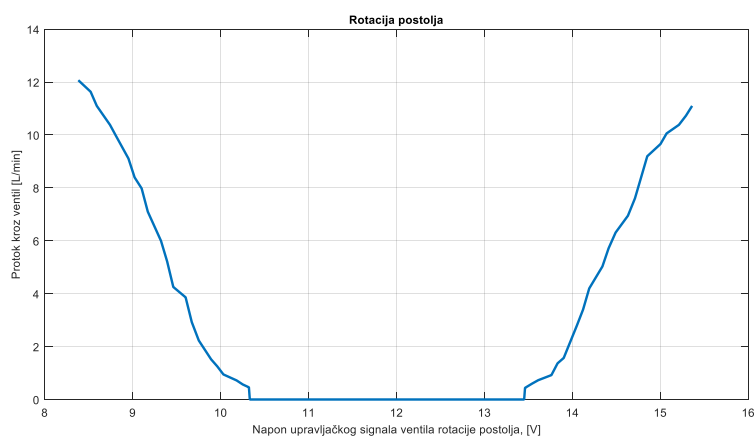
Za potrebe simulacije sustava u programskom alatu Simulink, programskog paketa Matlab, određena je digitalizirana mapa ugrađenih ventila (slika 4.) prema prethodno danoj naponskoj karakteristici ventila.



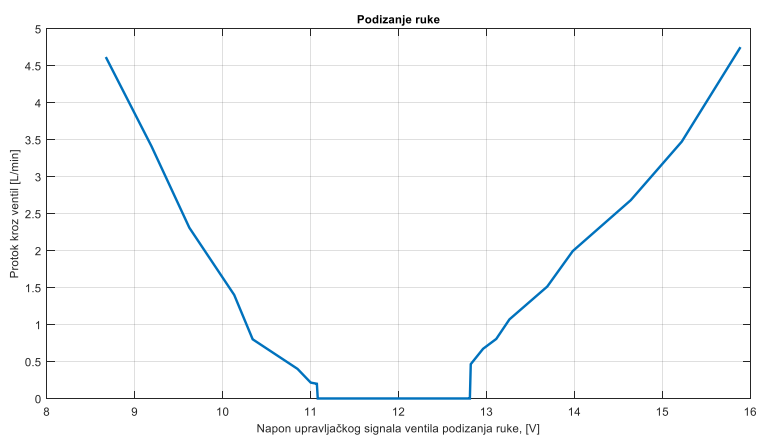
**Slika 4. Karakteristika proporcionalnog ventilskog bloka određenog digitalizacijom naponske karakteristike ventila prikazane na slici 3.**

Pri tome je pažnja pridana maksimalnim protocima ugrađenih ventila na manipulatoru koji određuju tip krivulje koji opisuje upravo traženi ventilski blok prema dijagramu na slici 3. i navedenim oznakama (AA, A, B, C, D, E). Određivanje točaka krivulja iz slike dijagrama se vršilo primjenom programa WebPlotDigitizer koji omogućuje označavanje osi dijagrama te kalibraciju u odnosu na mjere dijagrama te odabir željenih točaka.

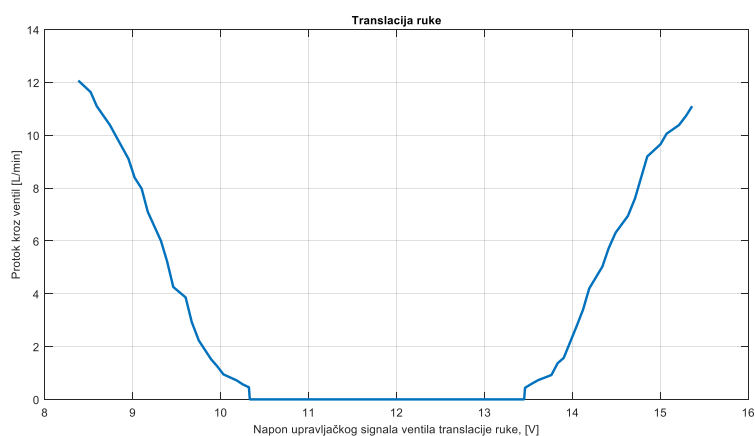
Kako bi se kroz simulaciju upravljačke strategije, koja je prikazana u poglavlju 4., dobili što vjerniji rezultati odziva manipulatora, ovako dobivene mape su provjerene eksperimentalno, vršenjem mjerenja na samome manipulatoru. Za svaku os je provedeno mjerenje vremena gibanja manipulatora iz dva krajnja položaja pojedinog stupnja slobode gibanja za upravljačke varijable koje su višekratnici broja 5, kako u pozitivnom, tako i u negativnom intervalu vrijednosti upravljačke varijable. Upravljačke varijable se kreću u cjelobrojnim intervalima od -100 do 100, pri čemu predznak određuje smjer gibanja pojedinog stupnja slobode gibanja, a iznos označuje postotak otvorenosti ventila pojedinog segmenta u odnosu na maksimalni iznos protoka za svaki segment, dok upravljačka varijabla iznosa nula označava zahtjev za mirovanjem. Dobivene vrijednosti vremena gibanja su potom preračunate, poznavajući dimenzijske karakteristike aktuatora (hidromotora i hidrauličkih cilindara), u same vrijednosti protoka kroz aktuatora za zadane vrijednosti upravljačke varijable. Pri tome se, unatoč ostvarivanju upravljačke varijable prema opisanim cjelobrojnim intervalima, posredno prati ovisnost protoka o samom naponu upravljačkog signala koji čini nezavisnu varijablu dobivenih dijagrama. Slika 5. prikazuje određene ovisnosti protoka kroz aktuatora za sva tri stupnja slobode gibanja.



a) prvi stupanj slobode gibanja – rotacija postolja



b) drugi stupanj slobode gibanja – rotacija ruke



c) treći stupanj slobode gibanja – translacija ruke

**Slika 5. Ovisnost protoka fluida o naponu upravljačkog signala na ventilima tri stupnja slobode gibanja**  
Prva odstupanja od naponske karakteristike protoka ventila su se pojavila već u potrebnom iznosu napona koji ostvaruje gibanje minimalnom brzinom, s obzirom na različite metode aktuacije i načine prijenosa gibanja svakog pojedinog stupnja slobode gibanja, o čemu će više

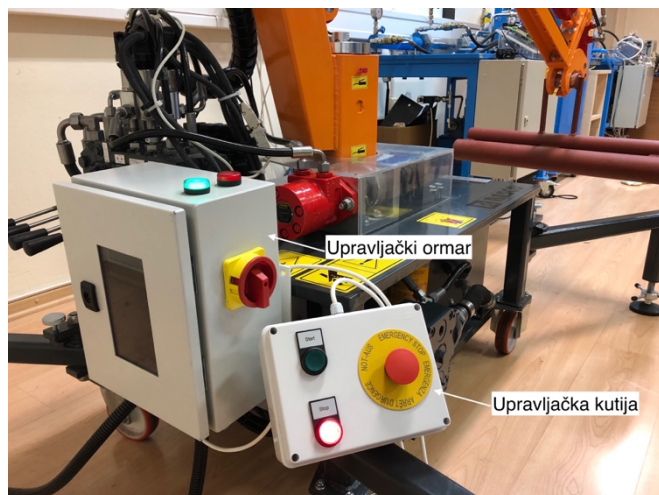
riječi biti u potpoglavlju 2.1.3. Nadalje, potrebno je napomenuti kako je unatoč opremljenosti drugog stupnja slobode gibanja (podizanje ruke manipulatora) ventilom maksimalnog protoka iznosa 40 L/min, raspon pulsno-širinske modulacije, koja iz cjelobrojnih intervala upravljačke vrijednosti određuje napon upravljačkog signala na ventilu, ograničen na vrijednost manju od maksimalne. Granica ograničenja se odredila prema zapažanjima tijekom podizanje ruke pri raznim brzinama te tehničkim karakteristikama manipulatora kao što su nosivost i pojava "stick-slip" trenja u rotacijskom zglobu promatranog stupnja slobode gibanja.

Za razliku od ovog programskog ograničenja unutar samog Arduino mikrokontrolera, protok hidromotora je ograničen fizički, putem vijaka za podešavanje maksimalnog hoda klipa ventila. Unatoč tom ograničenju, izmjereni protok kroz hidromotor je veći od nazivnog protoka pripadnog ventilskeg bloka. Pretpostavlja se da je razlog tomu upotreba sustava za određivanje protoka prema trenutnim zahtjevima aktuatora ("Load sensing" sustava) uz činjenicu da je hidromotor uparen s pužnim prijenosom velikog prijenosnog omjera. Naime, tlačnim kompenzatorom na "Load sensing" pumpi, određene su vrijednosti pada tlaka na ventilskeg bloku koje utječu na brzinu gibanja aktuatora. S obzirom da se navedena pumpa upotrebljava istovremeno za sve stupnjeve slobode gibanja, tlačni kompenzator mora moći jednom postavkom tlaka zadovoljiti minimalne brzine gibanja aktuatora. Imajući u vidu da se najveći zahtjevi u sustavu pojavljuju pri podizanju tereta na velikom kraku koji predstavlja duljina same ruke, tlačni kompenzator mora biti postavljen na za to prikladnu vrijednost. S takvom postavkom tlačnog kompenzatora, pri gibanju hidromotora koji, s obzirom na veliki prijenosni omjer pužnog vijka i način uležištenja zahtijeva puno manji pad tlaka, dolazi do velikog prebačaja u nazivnom protoku hidromotora. Kako bi se to kompenziralo, izvršilo se spomenuto ograničenje maksimalnog hoda cilindra ventila hidromotora, a posljedično i samog protoka hidrauličkog ulja kroz hidromotor.

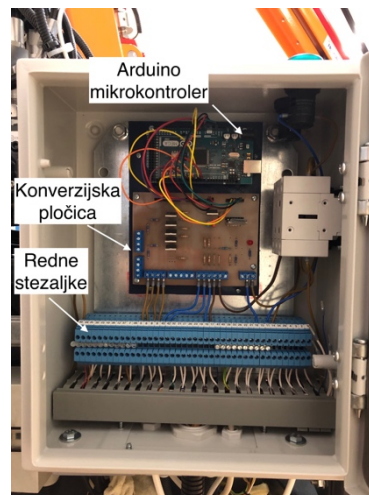
### ***2.1.2. Upravljački ormar i upravljačka kutija***

Upravljački ormar (slika 6.) manipulatora ispunjava funkciju ostvarivanja sigurnog pristupa žicama manipulatora preko spojnog 35-pinskog Deutsch konektora. Krajevi žica konektora su dostupni preko numeriranih rednih stezaljki, grupiranih ovisno o tome radi li se o žicama za napajanje mjernih komponenti manipulatora ili žicama za izlaz signala s istih. Grupiranje je izvedeno na taj način kako bi se omogućilo elegantno spajanje žica istih karakteristika (primjerice svih žica uzemljenja ili svih žica pozitivnog pola napajanja) primjenom

kratkospojnika namijenjenih za ugrađeni tip rednih stezaljki ili kako bi se olakšalo ožičenje izlaznih signala mjernih komponenti prema konverzijskoj pločici (slika 7.).



**Slika 6. Samostalno izrađeni upravljački sustav EHRM-a**



**Slika 7. Prikaz unutrašnjosti upravljačkog ormara**

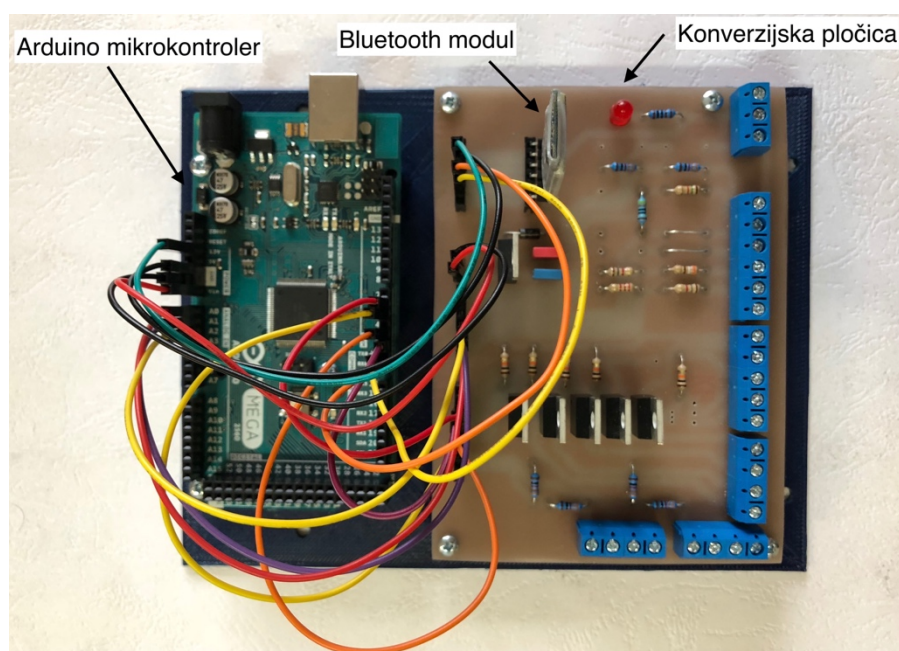
Uz to, ormar je opremljen grebenastom sklopkom preko koje se napajaju sve mjerne komponente manipulatora, ventilski blok manipulatora kao i sam upravljački sustav unutar ormara. Na vrhu upravljačkog ormara su postavljene LED svjetiljke za praćenje uvjeta manipulatora. Zelena svjetiljka signalizira status napajanja upravljačkog ormara, na način da je napajanje prisutno ako je svjetiljka upaljena, dok crvena svjetiljka signalizira da se manipulator nalazi u nedozvoljenom radnom području s obzirom na prvi stupanj slobode gibanja (vidi potpoglavlje 2.3.).

S obzirom da se sklopke napajanja manipulatora i upravljačkog ormara nalaze na samom manipulatoru, a kako bi se omogućilo operateru da sigurno napusti radno područje manipulatora prije omogućenja gibanja manipulatora, osmišljena je upotreba upravljačke kutije (slika 6.). Ona je kablom dostatne duljine vezana za upravljački ormar i omogućuje operateru da sa sigurnosne udaljenosti može pokrenuti rad manipulatora kada su uvjeti za to ispunjeni ili u svakom trenutku zaustaviti njegovo gibanje. Navedenom kutijom se izravno utječe na napajanje proporcionalnog ventilskog bloka, a isključivanjem napajanja se klipovi ventila vraćaju u središnji položaj čime se manipulator gotovo trenutno zaustavlja. Spomenuti uvjeti koje je potrebno zadovoljiti za omogućavanje napajanja ventilskog bloka odnosno pokretanje manipulatora su uvjeti sklopke za slučaj opasnosti i prekidača graničnog položaja. Naime, sklopka za slučaj opasnosti ne smije biti aktivirana, a prekidač graničnog položaja prvog stupnja

slobode gibanja mora biti aktiviran što sugerira da se manipulator nalazi u dopuštenom radnom području s obzirom na rotaciju postolja manipulatora.

### 2.1.3. Konverzijska pločica

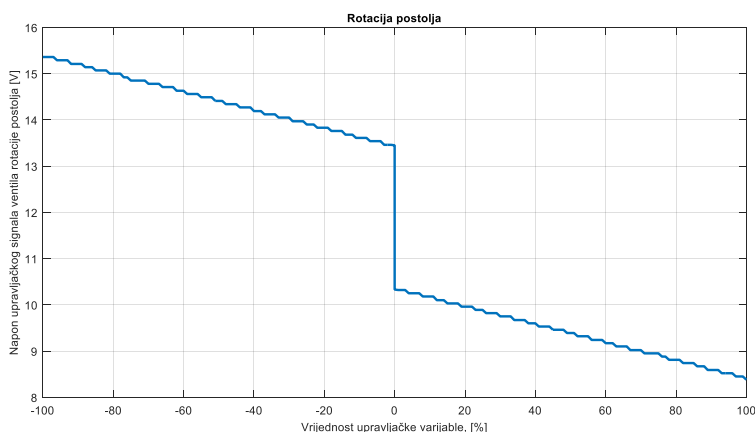
Konverzijska pločica, prikazana na slici 8., služi za pretvorbu naponskih signala mikrokontrolera na potrebnu razinu naponskog istosmjernog signala u intervalu od 0 V do 24 V za upravljanje proporcionalnim ventilskim blokom manipulatora. Za tu potrebu su upotrebljeni MOSFET tranzistori koji se ovisno o željenom izlaznom naponu prema ventilskom bloku upravljaju pulsno-širinskom modulacijom Arduino mikrokontrolerom.



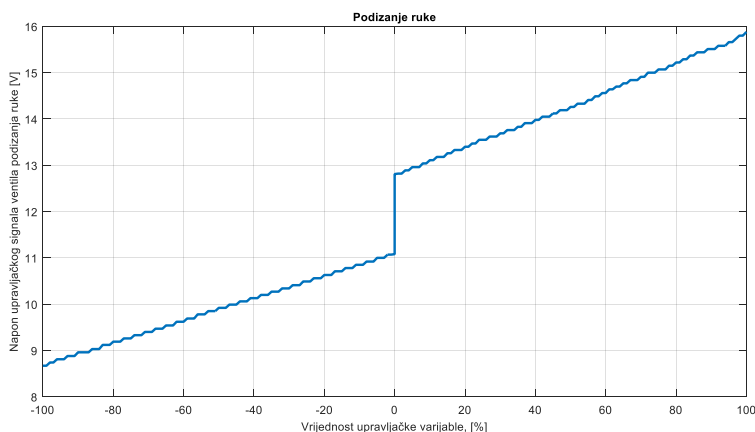
Slika 8. Konverzijska pločica povezana s Arduino mikrokontrolerom [1]

Za izrađenu pločicu je eksperimentalno utvrđena ovisnost napona na ventilskom bloku o vrijednosti upravljačke varijable iz cjelobrojnog intervala od -100 do 0 i od 0 do 100. Navedeni intervali predstavljaju postotak naponskog signala s obzirom na dvije vrijednosti signala koje uzrokuju ostvarenje gibanja s minimalnom i maksimalnom brzinom. Pri tome je razlika između intervala u negativnom i pozitivnom području, u samom smjeru aktuacije pojedinog stupnja slobode gibanja. S obzirom na specifičnost u načinu aktuiranja svakog pojedinačnog stupnja slobode gibanja manipulatora, bilo je također nužno odrediti navedenu ovisnost za svaki pojedinačni stupanj slobode gibanja. Jedan od razloga tome je primjena hidrauličkog razvodnika za aktuaciju podiznog cilindra ruke s maksimalnim protokom iznosa 40 L/min, dok su za aktuaciju hidromotora upotrijebljeni hidraulički razvodnici maksimalnog protoka iznosa

10 L/min. S druge strane, tri različita načina aktuacije podrazumijevaju i tri različita načina na koji aktuatori djeluju na mehaničku strukturu robota kako bi izvršili njezino gibanje. Tako je u slučaju rotacije postolja upotrijebljen pužni par za smanjenje brzine vrtnje hidromotora i prijenos gibanja između mimosmjernih vratila hidromotora i samog postolja koja se nalaze pod pravim kutom. Nadalje, za podizanje ruke manipulatora je upotrijebljen dvoradni hidraulični cilindar koji svojim produljenjem aktira ruku manipulatora na kraku oko osovine, čime se translacijsko gibanje klipnjače cilindra pretvara u rotacijsko gibanje ruke. Na kraju, za translacijsko gibanje ruke je upotrijebljen dvoradni teleskopski hidraulični cilindar koji upotrebom šine uzrokuje relativno gibanje između dijela ruke kruto vezanog na postolje i dijela koji nosi hidraulički aktiranu prihvatnicu. S obzirom na navedene specifičnosti, a uz dodatni utjecaj sustava za određivanje protoka pumpe ("Load sensing" sustava), za pokretanje pojedinog stupnja slobode gibanja su nužne različite vrijednosti upravljačkog signala na pojedinom hidrauličnom razvodniku. Slika 9. prikazuje izrađene mape za svaki pojedini stupanj slobode gibanja za već opisan interval vrijednosti upravljačke varijable.

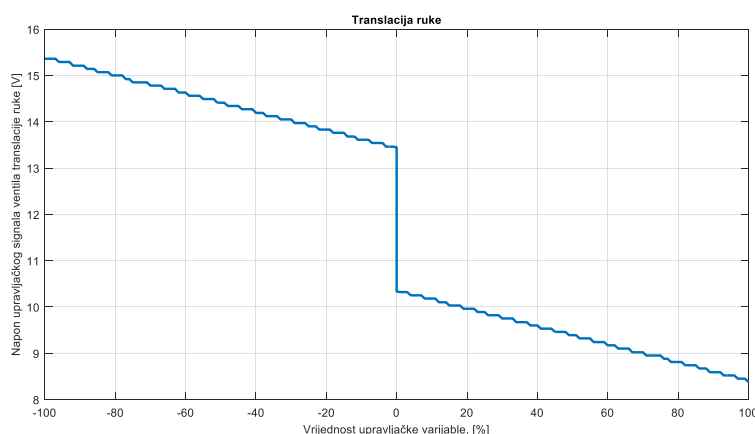


a) prvi stupanj slobode gibanja – rotacija postolja



b) drugi stupanj slobode gibanja – rotacija ruke





c) treći stupanj slobode gibanja – translacija ruke

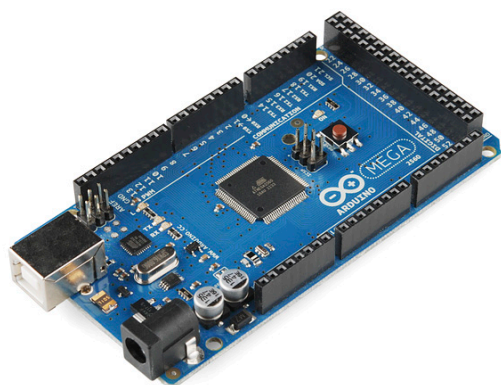
**Slika 9. Mape ovisnosti vrijednosti napona na izlazu konverzijske pločice u ovisnosti o vrijednosti upravljačke varijable od strane tablet uređaja**

Pri tome nije bilo moguće pretpostaviti izraz analitički zbog nepoznavanja unutarnje strukture elektroničkih komponenti ventila i njihovih dinamičkih karakteristika, no eksperimentalno se pokazalo da je ovisnost približno linearna po segmentima. Na mapama je također vidljivo da se vrijednosti mijenjaju istaknuto stepeničasto što je uzrokovano samom 8-bitnom pulsno-širinskom modulacijom mikrokontrolera kojom je cjelokupno područje napajanja u intervalu od 0 do 24 V moguće podijeliti na samo 256 dijelova ( $2^8=256$ ). Uzimajući u obzir da je razlika naponskog signala između zatvorenog i potpuno otvorenog razvodnika samo 20% iznosa napona napajanja razvodnika (slika 3.), navedeni broj podjela je još dodatno smanjen.

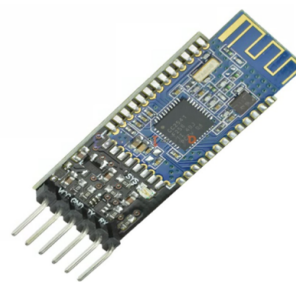
#### **2.1.4. Arduino mikrokontroler u funkciji bežične komunikacije**

Za interpretaciju upravljačkih naredbi između tableta i konverzijske pločice upotrebljen je mikrokontroler Arduino Mega 2560 (slika 10.) uz primjenu Bluetooth modula HM-10 (slika 11.).

Bluetooth modul vrši izravnu komunikaciju s tabletom primajući njegove naredbe te povratno prosljeđujući trenutna stanja mjernih komponenti manipulatora s ciljem mogućnosti regulacije položaja manipulatora. Mikrokontroler prima informacije prosljeđene od strane Bluetooth modula i mapira ih u upravljačke vrijednosti pulsno-širinske modulacije tranzistora te posljedično upravlja proporcionalnim ventilskim blokom manipulatora.



Slika 10. Arduino Mega 2560 mikrokontroler [3]



Slika 11. HM-10 Bluetooth modul s poveznim pinovima prikladnima za Arduino mikrokontroler [4]

Za razliku od trenutno iskorištenih mogućnosti mikrokontrolera, pri čemu je bila ostvarena samo jednosmjerna komunikacija u svrhu prenošenja informacija s mobilnog uređaja prema mikrokontroleru, u ovom radu je potrebno proširiti tu mogućnost na dvosmjernu komunikaciju s krajnjim ciljem ostvarenja povratne veze varijabli stanja i procesnih varijabli manipulatora. O tome će više riječi biti u sljedećem poglavlju gdje će biti istaknuti problemi s kojima se susrelo te će biti navedena implementirana rješenja tih problema.

## 2.2. Mjerni dio sustava

Mjernim komponentama ugrađenim na manipulator je moguće mjerenje procesnih veličina tlaka, sile, te upravljanih koordinata. U ovom dijelu će biti detaljnije objašnjene mjerne komponente namijenjene mjerenju položaja svakog člana ruke manipulatora, rotacijski davači za mjerenje rotacijskih stupnjeva slobode gibanja i potezni potencijometar za mjerenje položaja translacijskog člana. Također će biti navedene i dodatne radnje koje je bilo potrebno učiniti kako bi se omogućilo točno i pouzdano mjerenje.

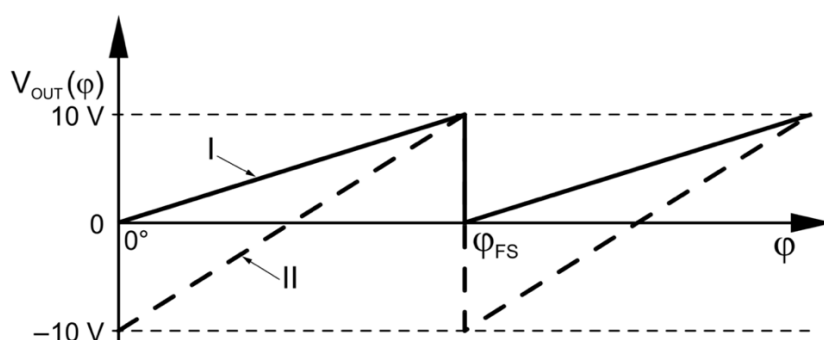
### 2.2.1. Mjerenje kuta zakreta

Mjerenje kuteva zakreta rotacijskih stupnjeva slobode se provodi ugrađenim viskobrzinskim apsolutnim rotacijskim davačima pozicije tvrtke RLS merilna tehnika d.o.o.

Senzori su napajani istosmjernim naponom iznosa 24 V preko ispravljača ugrađenim na manipulator, a odlikuje ih robusna beskontaktna konstrukcija i izlazni istosmjerni naponski mjerni signal u rasponu od 0 do 10 V [5]. S obzirom da je ostvarivi kut zakreta postolja

manipulatora iznosa  $270^\circ$ , a kut rotacije ruke  $74^\circ$  sukladno tome su odabrane vrste rotacijskih davača, kako bi se ostvarila maksimalna moguća rezolucija mjerenja.

Prema tome je za mjerenje kuta postolja odabran rotacijski davač radnog područja  $360^\circ$ , dok je za mjerenje kuta zakreta ruke odabran rotacijski davač mjernog intervala  $180^\circ$ . Samo mjerno područje ne znači da je rotacija davača fizički ograničena na zadani kut mjernog područja, već to primjerice znači da će rotacijski davač mjernog područja iznosa  $180^\circ$  u sklopu jednog punog okreta ( $360^\circ$ ) dva puta dati istosmjerni mjerni signal u rasponu od 0 do 10 V kao što je punom linijom s oznakom "I" prikazano na slici 12.



**Slika 12. Prikaz izlaznog signala rotacijskog davača u ovisnosti o kutu s mjernim područjem označenim oznakom  $\varphi_{FS}$  [5]**

Navedeni mjerni davači su sposobni raditi na brzinama vrtnje do 30000 okretaja u minuti što znači da se može očekivati njihov brz i pouzdan rad na brzinama koje se mogu očekivati u radu manipulatora, a koje su značajno manje od navedene granice.

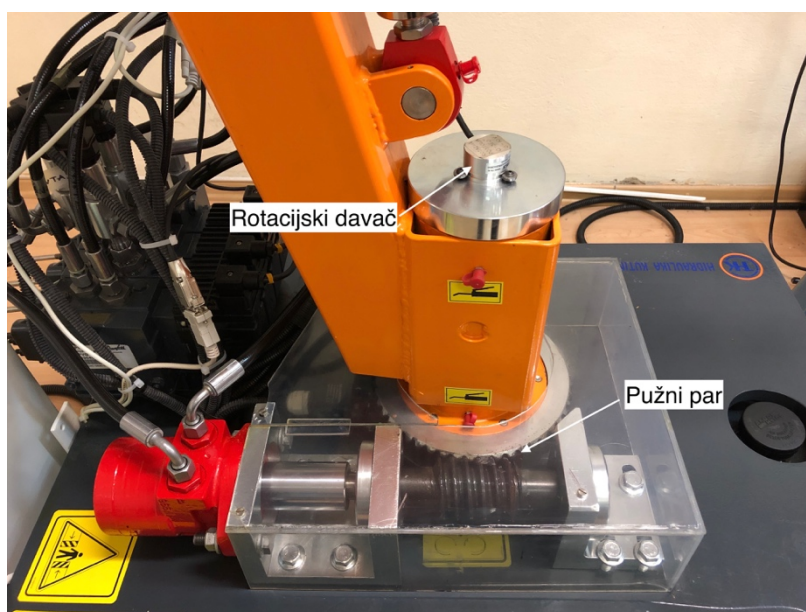
Iako su pristupni pinovi rotacijskih davača, za razliku od ostalih komponenti manipulatora, smješteni na zasebnim DB9 konektorima, oni su također provedeni preko uvodnica u upravljački ormar pri čemu se navedenim pinovima davača može pristupiti putem rednih stezaljki. Za tu potrebu je upotrebljen dodatni, produžni DB9 kabel koji je prerezan na pola duljine te čiji su krajevi žica ogoljeni i uvedeni u upravljački ormar putem kablskih uvodnica, dok je ženski utikač kabela povezan na muški izlaz kabela davača.

S obzirom da se za očitavanje naponskih signala mjernih komponenti upotrebljava Arduino mikrokontroler, nužno je naponske signale komponenti svesti na naponski interval od 0 do 5 V DC kako bi se oni mogli očitati analogno-digitalnim pretvornikom mikrokontrolera. Kako su intervali mjernih komponenti međusobno različiti, bit će dan način prilagodbe mjernih signala na zadani interval za svaku os zasebno. Pri tome se navedenom pretvorbom mogu odrediti 1024

razine signala koje odgovaraju vrijednostima iz spomenutog intervala, s obzirom na primjenu ugrađenog 10-bitnog pretvornika Arduino mikrokontrolera ( $2^{10} = 1024$ ).

### 2.2.1.1. Mjerenje kuta zakreta prvog stupnja slobode gibanja

Mjerenje kuta zakreta prvog stupnja slobode se izvodi RLS rotacijskim davačem oznake RM36VA0009B20A2B00, mjernog područja iznosa  $360^\circ$ , smještenim na gornjem dijelu osovine kojom je osigurano uležištenje ruke manipulatora [6] (slika 13.).



**Slika 13. Rotacijski davač kuta zakreta postolja manipulatora**

Gledajući iz smjera elektroormara (slika 2.) krajnje lijevi položaj je ostvaren pri naponu mjernog signala u iznosu od 5,69 V, a krajnji desni položaj pri iznosu napona mjernog signala od 3,13 V. Pritom je potrebno napomenuti da se mjerni signal ne mijenja u intervalu od 5,69 V do 3,13 V već u komplementarnom intervalu. Počevši s krajnje lijevom položajem u kojem je napon mjernog signala 5,69 V, on se pomicanjem ruke u smjeru kazaljke na satu povećava do 10 V pri čemu potom padne na 0 V te dalje kontinuirano raste do dostizanja krajnje desne pozicije u kojoj je napon mjernog signala 3,13 V. Zbog navedenog diskontinuiteta nije moguće uspostaviti jednoznačan izraz ovisnosti kuta zakreta postolja o naponu mjernog signala [1].

Sukladno tome je bilo nužno provesti zakretanje magnetskog aktuatora (slika 14.) rotacijskog davača kako bi se mjerni interval uskladio s potrebama za jednostavnom interpretacijom mjernog signala. Za uklanjanje rotacijskog davača je bilo nužno ukloniti tri vijka s inbus glavama koji preko podložnih pločica s odgovarajućim zarezom drže rotacijski davač čvrsto na

sklopu ruke manipulatora (slika 13.), koristeći utor na kućištu rotacijskog davača. Po uklanjanju rotacijskog davača se moglo primijetiti da je magnetski aktuator pozicioniran na izdanku postolja manipulatora neučvršćen, što bi predstavljalo veliki rizik akvizicije krivih mjerenja.



**Slika 14. Magnetski aktuator beskontaktnog rotacijskog davača kuta zakreta postolja**

Istraživanjem problema je utvrđeno da je promjer uvrta magnetskog aktuatora iznosa 6 mm, dok je promjer izdanka postolja 5 mm. Prilikom pokušaja fiksiranja aktuatora na izdanak putem bočnog inbus vijka, dolazi do odgurivanja aktuatora u ekscentrični položaj čime se onemogućuje montaža kućišta davača. Problem je riješen narudžbom i instalacijom magnetskog aktuatora promjera uvrta 5 mm kod kojeg, prilikom učvršćivanja, ne dolazi do navedene pojave već je aktuator moguće sigurno učvrstiti na izdanak te time ostvariti zadovoljavajuću centričnost komponenti i izbjegavanje međusobnog kontakta izdanka i kućišta senzora.

Nakon izvršenog zakretanja magnetskog aktuatora, određene su vrijednosti napona mjernog signala u dvije krajnje pozicije manipulatora s obzirom na rotaciju postolja. Krajnje pozicije su definirane pomoću prekidača graničnog položaja (vidi potpoglavlje 2.3.), koji prekida napajanje ventila, čime se klipovi ventila vraćaju u neutralnu poziciju, zaustavljajući time protok ulja i posljedično ostvarujući gotovo trenutno zaustavljanje manipulatora.

Pri tome je određeno da napon mjernog signala u krajnje lijevom položaju ruke manipulatora iznosi 1,21 V, dok u krajnje desnom položaju iznosi 8,70 V, pri čemu se orijentacije lijevo i desno računaju s obzirom na pogled od upravljačkog ormara u smjeru spremnika hidrauličkog ulja manipulatora.

S obzirom na određene vrijednosti napona mjernog signala, moguće je uspostaviti izraz ovisnosti kuta zakreta postolja manipulatora  $\varphi(V_m)$  o naponu mjernog signala  $V_m$ . Uzimajući pretpostavku da je položaj u kojem je kut zakreta postolja  $0^\circ$  krajnje lijevi položaj, ta ovisnost se može izraziti sljedećim izrazom:

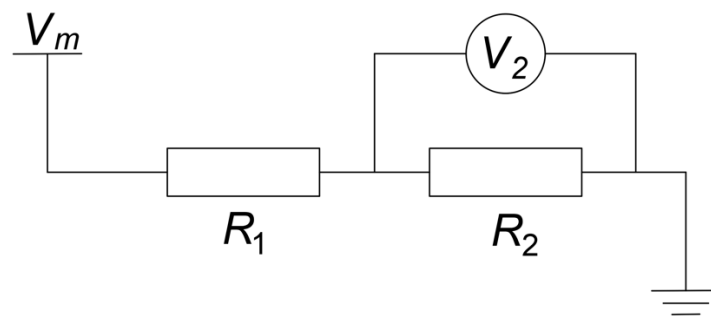
$$\varphi(V_m) = 36 \cdot (V_m - 1,21) \text{ [}^\circ\text{]}, \quad (2.1)$$

odnosno:

$$\varphi(V_m) = 0,6283 \cdot (V_m - 1,21) \text{ [rad]}. \quad (2.2)$$

Kako bi se navedeni naponski signal u intervalu od 1,21 V do 8,70 V sveo na interval koji se može očitati Arduino mikrokontrolerom, upotrebjeno je naponsko djelilo s omjerom otpornika prema izračunu koji je dan u nastavku.

S obzirom da se većina lako dostupnih otpornika nalazi u klasi točnosti koja od nazivne vrijednosti odstupa  $\pm 5\%$ , a kako bi se osiguralo da napon ne prijeđe maksimalno dozvoljenih 5 V, zadana je ciljna maksimalna vrijednost tako skaliranog naponskog signala u iznosu od 4,8 V. Skica predloženog naponskog djelila je prikazana na slici 15.



**Slika 15. Skica predloženog naponskog djelila za akviziciju mjernog signala enkodera prvog stupnja slobode gibanja**

Sukladno navedenoj ciljnoj vrijednosti naponskog signala koja se treba postići na otporniku označenim oznakom  $R_2$  za maksimalni iznos napona mjernog signala enkodera od 8,70 V, pad napona  $V_1$  na otporniku oznake  $R_1$  mora iznositi:

$$V_1 = 8,70 \text{ V} - 4,80 \text{ V} = 3,90 \text{ V}. \quad (2.3)$$

Prema tome, omjer padova napona na otpornicima mora iznositi:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{3,9 \text{ V}}{4,8 \text{ V}} = 0,8125. \quad (2.4)$$

Kako su otpornici povezani serijski, vrijedi sljedeća jednakost :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.5)$$

S obzirom na navedenu jednakost potrebno je odrediti moguće vrijednosti otpornika  $R_1$  i  $R_2$  njihovim izborom iz standardno dostupnih vrijednosti otpornika. Pri tome treba imati u vidu najveću dopuštenu struju  $I_{\max}$  koju mjerni element može pružiti, koja za prethodno navedeni enkoder iznosi 10 mA. Uzimajući u obzir navedeni uvjet i maksimalno mogući naponski mjerni signal samog enkodera  $V_{\max}$  iznosa 10 V, minimalni ukupni otpor  $R$  što ga čine otpornici  $R_1$  i  $R_2$  ne smije biti manji od:

$$R_{\min} = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} = \frac{10 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 1000 \Omega. \quad (2.6)$$

Pri izračunu se u obzir uzima najnepovoljniji slučaj koji podrazumijeva da je otpornik 1 minimalne propisane tolerancijske vrijednosti otpora  $R_{1\min}$  :

$$R_{1\min} = 0,95 \cdot R_1, \quad (2.7)$$

a otpornik 2 maksimalne propisane tolerancijske vrijednosti otpora  $R_{2\min}$  :

$$R_{2\min} = 1,05 \cdot R_2. \quad (2.8)$$

Prema svim navedenim uvjetima, odabrani su otpornici vrijednosti

$$R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega \text{ i } R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega. \quad (2.9)$$

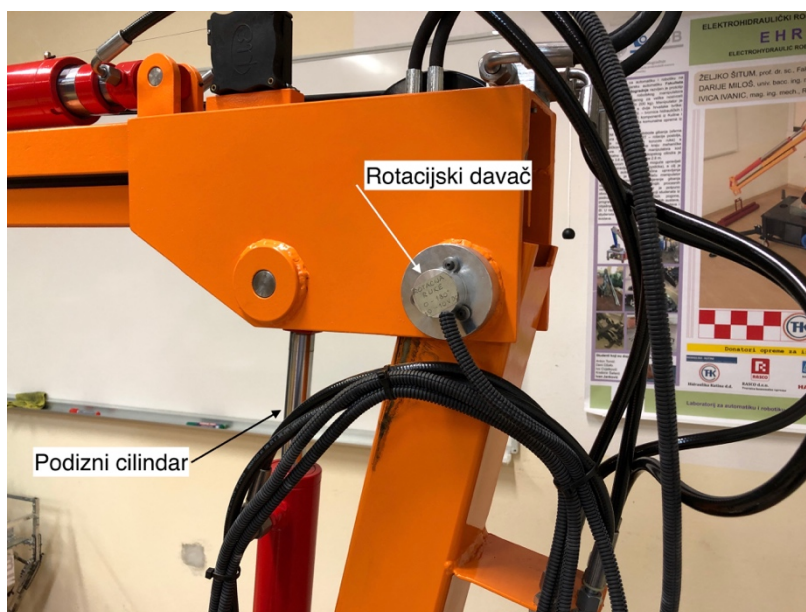
Njihovom primjenom se ostvaruje maksimalan napon na otporniku  $R_2$  iznosa 4,785 V za maksimalnu nazivnu vrijednost mjernog signala iznosa 8,70 V, dok se za maksimalnu moguću vrijednost napona mjernog signala u slučaju graničnih tolerancijskih vrijednosti otpora otpornika postiže napon iznosa 4,999 V. Navedene vrijednosti napona u svim slučajevima zadovoljavaju maksimalno dopuštene vrijednosti naponskog signala za očitavanje Arduino mikrokontrolerom. Za ovako odabrane vrijednosti otpornika naponskog djelila, ovisnost kuta zakreta postolja  $\varphi(V_{AD})$  o iznosu napona očitano Arduino mikrokontrolerom  $V_{AD}$  opisana je sljedećim izrazom:

$$\varphi(V_{AD}) = \frac{270}{840} \cdot (V_{AD} - 132) \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (2.10)$$

Uzimajući u obzir mjerni interval kuta rotacije prvog stupnja slobode gibanja u iznosu od 270° i da je upotrebom Arduino mikrokontrolera za prethodno opisan sustav moguće odrediti 840 razina diskretizacije napona mjernog signala rotacijskog davača, može se lako odrediti da mjerna rezolucija opisanog sustava iznosi 0,32°.

### 2.2.1.2. Mjerenje kuta zakreta drugog stupnja slobode gibanja

Maksimalni kut zakreta ruke manipulatora mjeren između dva krajnja položaja ograničen je na  $74^\circ$  mogućim hodom dvoradnog hidrauličkog podiznog cilindra. S obzirom na smanjeni radni kut drugog stupnja slobode u odnosu na prvi, za potrebu mjerenja kuta zakreta je odabran rotacijski davač oznake RLS RM36VB0009B20A2B00, mjernog područja  $180^\circ$  (slika 16.).



Slika 16. Rotacijski davač kuta zakreta ruke manipulatora

Napon mjernog signala u slučaju kada se ruka nalazi u najnižem položaju s potpuno uvučenim cilindrom iznosi  $1,82\text{ V}$ , dok u najvišem položaju ruke kada je dvoradni cilindar potpuno izvučen napon mjernog signala iznosi  $5,84\text{ V}$ . Ako se početni položaj ruke manipulatora postavi u krajnje uvučenom položaju cilindra  $\varphi = 0^\circ$ , proizvoljan kut zakreta ruke manipulatora između dva krajnja položaja u ovisnosti o naponu mjernog signala  $V_m$  je moguće odrediti prema sljedećem izrazu:

$$\varphi(V_m) = 18 \cdot (V_m - 1,82) [^\circ], \quad (2.11)$$

odnosno:

$$\varphi(V_m) = 0,3142 \cdot (V_m - 1,82) [^\circ]. \quad (2.12)$$

Kao i u slučaju rotacijskog davača kuta zakreta postolja manipulatora, nužno je izvršiti prilagodbu naponskog mjernog signala za očitavanje Arduino mikrokontrolerom prema već opisanom postupku.

Sukladno tome, pokazalo se da otpornici trebaju biti istih otpora u zbroju većih od  $1\text{ k}\Omega$ , dok su odabrani sljedeći iznosi njihovih otpora:



$$R_1 = 390 \, \Omega \text{ i } R_2 = 1,8 \, \text{k}\Omega. \quad (2.13)$$

Njihovom primjenom se ostvaruje maksimalan napon na otporniku  $R_2$  iznosa 4,88 V za maksimalnu nazivnu vrijednost mjernog signala iznosa 5,84 V.

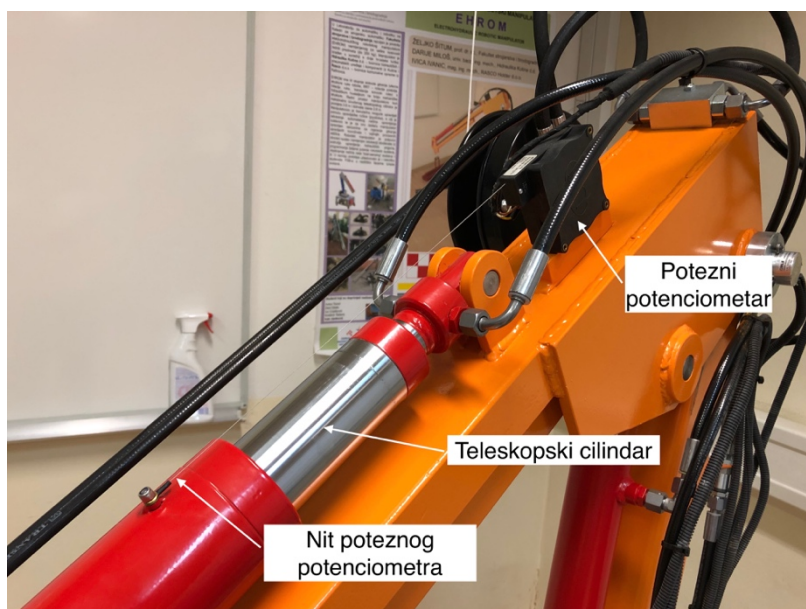
Za ovako odabrane vrijednosti otpornika naponskog djelila, ovisnost kuta zakreta ruke manipulatora  $\varphi(V_{A/D})$  o iznosu napona očitanoj Arduino mikrokontrolerom  $V_{A/D}$  opisana je sljedećim izrazom:

$$\varphi(V_{A/D}) = \frac{74}{672} \cdot (V_{A/D} - 310) \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (2.14)$$

Uzimajući u obzir mjerni interval kuta rotacije drugog stupnja slobode gibanja u iznosu od  $74^\circ$  i da je upotrebom Arduino mikrokontrolera za prethodno opisan sustav moguće odrediti 672 razine diskretizacije napona mjernog signala rotacijskog davača, može se lako odrediti da mjerna rezolucija opisanog sustava iznosi  $0,11^\circ$ .

### 2.2.1.3. Mjerenje translacije

Za mjerenje pozicije translacijskog člana, ugrađen je potezni potencijometar s analognim izlazom oznake Micro-epsilon WPS-2100-MK77-P25 (slika 17.).



Slika 17. Linearni potencijometar s djelomično izvučenom poteznom niti

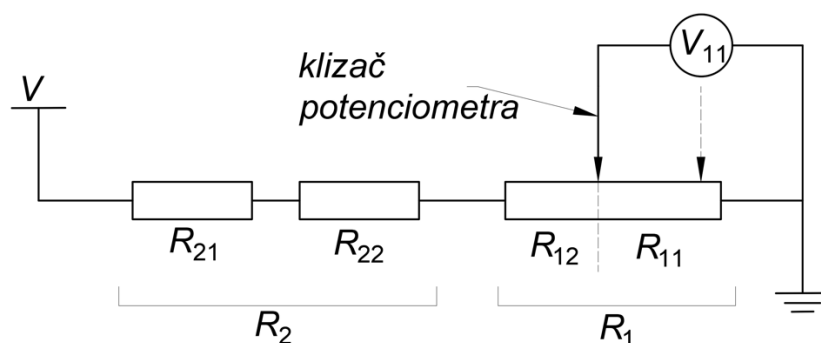
Mjerenje se provodi mjerenjem same duljine teleskopskog cilindra za što je upotrebljen navedeni potezni linearni potencijometar mjernog raspona od 0 do 2100 mm [7], koji je odabran s obzirom na maksimalni hod cilindra koji iznosi 1000 mm.

Funkcionirajući na principu naponskog djelila, izlazni napon ovisi o naponu napajanja te je utvrđeno da je za napon napajanja putem ispravljača manipulatora (24 V DC) i potpuno uvučeni translacijski član, vrijednost izlaznog napona 2,57 V DC dok je pri potpuno izvučenom translacijskom članu vrijednost izlaznog napona 13,86 V. Uzimajući u obzir hod i dobivene vrijednosti napona u krajnjim pozicijama, duljina teleskopskog cilindra  $s$  za mjerenu vrijednost izlaznog napona  $V_m$  i napon napajanja u iznosu od 24 V DC se određuje prema sljedećem izrazu [1]:

$$s(V_m) = 88,5740 \cdot (V_m - 2,57) \text{ [mm]}. \quad (2.15)$$

Potezni potenciometar je ukupnog otpora  $R_1$ , iznosa 1 k $\Omega$ , dok pri potpuno izvučenom stanju koje odgovara naponu mjernog signala u iznosu od 13,86 V otpor između uzemljenja i priključka za mjerni naponski signal iznosi 577  $\Omega$ . Kako bi se navedeni interval od 2,57 V do 13,86 V sveo na interval pogodan za mjerenje napona mjernog signala Arduino mikrokontrolerom, u seriju s čitavim otpornikom potenciometra, a na strani pozitivnog priključka napajanja, je potrebno dodati otpornik prikladne vrijednosti otpora.

Određivanje prikladne vrijednosti otpora se ponovno temelji na određivanju nepoznatog otpora naponskog djelila. Pri tome je jedna vrijednost otpora već poznata i iznosi upravo 577  $\Omega$ , što predstavlja otpor dijela potenciometra  $R_{11}$  kojeg klizač potenciometra obuhvaća potpunim izvlačenjem teleskopskog cilindra (Slika 18slika 18.).



Slika 18. Skica predloženog naponskog djelila za akviziciju mjernog signala potenciometra translacijskog člana

Pri tome jasno vrijedi da je:

$$R_1 = R_{11} + R_{12}, \quad (2.16)$$

odnosno da uz  $R_{11}$  iznosa 577  $\Omega$ , vrijednost otpornika  $R_{12}$  iznosi:

$$R_{12} = R_1 - R_{11} = 1000 \text{ } \Omega - 577 \text{ } \Omega = 423 \text{ } \Omega. \quad (2.17)$$

Nadalje, cilj je ponovno ostvariti maksimalnu vrijednost  $V_{11\max}$  očitano naponskog signala s potenciometra u iznosu od oko 4,9 V što znači da se razlika do napona napajanja  $V$  iznosa 24 V mora ostvariti padom napona  $V_{12}$  na preostalom dijelu otpornika potenciometra  $R_{12}$  i padom napona  $V_2$  na novododanom otporniku  $R_2$ . S obzirom na tako postavljen spoj, potreban iznos otpornika  $R_2$  je moguće odrediti prema sljedećem izrazu:

$$R_2 = \frac{V - V_{11\max}}{V_{11}} \cdot R_{11} - R_{12} = \frac{24 - 4,8}{4,8} \cdot 577 - 423 = 1886 \Omega. \quad (2.18)$$

Kako bi se, kao i u prethodnim slučajevima izračuna, kompenziralo moguće prekoračenje iznosa napona od 5 V uslijed tolerancija na vrijednosti otpora otpornika, odabrano je da će se potrebni otpor ostvariti zbrojem dva otpora otpornika standardnih vrijednosti. Pri tome su odabrani otpornici čiji zbroj predstavlja otpor otpornika  $R_2$  sljedeći:

$$R_{21} = 1,5 \text{ k}\Omega \text{ i } R_{22} = 430 \Omega. \quad (2.19)$$

Time je ukupan nazivni otpor  $R_2$  jednak:

$$R_2 = R_{21} + R_{22} = 1500 \Omega + 430 \Omega = 1930 \Omega, \quad (2.20)$$

odnosno u najnepovoljnijem slučaju, ako su vrijednosti otpora otpornika na donjoj tolerancijskoj vrijednosti od -5 %, ukupna vrijednost otpora otpornika  $R_2$  tada iznosi 1833  $\Omega$ .

Za navedenu vrijednost otpora uz već postojeću vrijednost  $R_{12}$ , maksimalni pad napona  $V_{11}$  na otporniku  $R_{11}$  tada iznosi 4,89 V što zadovoljava zahtjev za maksimalnim iznosom napona za njegovo očitavanje putem Arduino mikrokontrolera u svim mogućim slučajevima odabranih otpora  $R_{21}$  i  $R_{22}$ .

Konačno, ovisnost duljine teleskopskog cilindra  $s(V_{AD})$  o iznosu napona očitano Arduino mikrokontrolerom  $V_{AD}$  opisana je sljedećim izrazom:

$$s(V_{AD}) = \frac{1000}{801} \cdot (V_{AD} - 178) \text{ [mm]}. \quad (2.21)$$

Uzimajući u obzir mjerni interval translacijskog člana u iznosu od 1000 mm i da je upotrebom Arduino mikrokontrolera za prethodno opisan sustav moguće odrediti 801 razinu diskretizacije napona mjernog signala rotacijskog davača, može se lako odrediti da mjerna rezolucija opisanog sustava iznosi 1,25 mm.

### 2.3. Sigurnosni dio sustava

Sigurnosni dio sustava manipulatora čini prekidač graničnih položaja (slika 19.) rotacije prvog stupnja slobode gibanja koji onemogućava gibanje manipulatora ukoliko se njegova ruka zakrene u tolikoj mjeri da izađe iz propisanih sigurnosnih granica radnog područja.



Slika 19. Schmersal prekidač graničnih položaja

S obzirom da je riječ o hidrauličkom manipulatoru, dobavna crijeva hidrauličkog ulja pružaju određena ograničenja u njegovom kretanju te kako ne bi došlo do njihovih oštećenja ili uništenja rotacija postolja mora biti ograničena na 270 °. Stoga je imperativ omogućavanje sigurnog kretanja manipulatora u ručnom, a posebice u automatskom režimu rada, kako iz bilo kojeg razloga ne bi došlo do zakretanja manipulatora u nedozvoljeno radno područje. Iz tog razloga je kolo postolja adekvatno strojno obrađeno kako bi u krajnjim položajima deaktiviralo prekidač graničnog položaja.

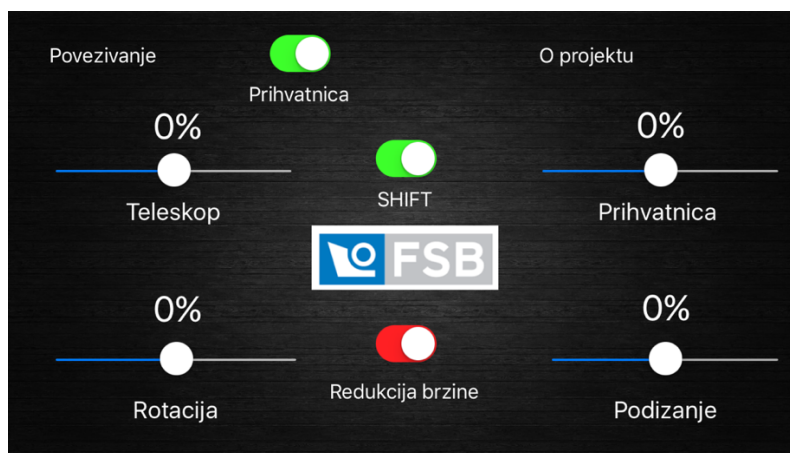
S obzirom da je prekidač graničnog položaja izravno povezan na uzbudnu struju sklopnika napajanja proporcionalnog ventila, u bilo kojem slučaju prestizanja jednog od krajnjih položaja dolazi do isključenja napajanja ventila čime se omogućava sigurno zaustavljanje manipulatora eliminirajući time mogućnost oštećenja hidrauličkih crijeva ili okoline manipulatora.

### 3. IZRADA UPRAVLJAČKE APLIKACIJE

#### 3.1. Zahtjevi na upravljačku aplikaciju

S ciljem izrade aplikacije koja bi pružala dostatne mogućnosti u smislu automatiziranog upravljanja, nužno je definirati zahtjeve koje navedena aplikacija mora ispunjavati. Pri tome će se zahtjevi u sklopu ovog rada fokusirati na omogućavanje osnovnog kretanja u automatskom režimu rada. To uključuje mogućnost pozicioniranja manipulatora u željenoj poziciji, pamćenje dostignutih točaka, definiranje parametara manipulatora za pojedinu točku (status prihvatnice, brzina dostizanja točke, treba li se manipulator zaustaviti u točki), mogućnost organizacije memoriranih točaka (njihovo premještanje, kopiranje i brisanje), mogućnost praćenja dijagrama mjernih veličina stupnjeva slobode gibanja te konačno mogućnost izvođenja automatiziranog upravljanja s uređajem sa zaslonom osjetljivim na dodir u ulazi bežičnog regulatora.

Upravljanjem manipulatora preko prethodno izrađene aplikacije EHRM (slika 20.) za mobilni uređaj sa zaslonom osjetljivim na dodir, uočeno je kako bi za daljni razvoj aplikacije u smjeru automatiziranog upravljanja bilo nužno ostvariti veću površinu zaslona uređaja.

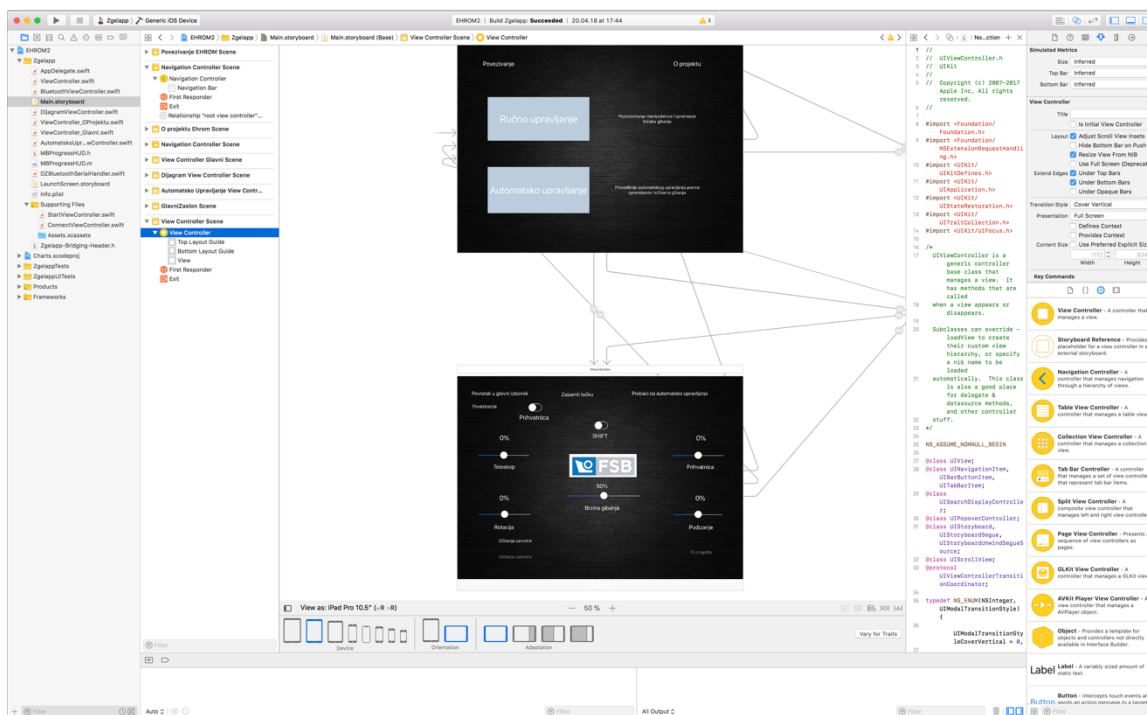


Slika 20. Primjer zaslona za zadavanje upravljačkih varijabli postojeće upravljačke aplikacije EHRM na mobilnom uređaju iPhone

Naime, s obzirom na sve zahtijevane mogućnosti, površina zaslona mobilnog uređaja ne bi mogla pružiti dovoljnu preglednost i lakoću upravljanja. Iz tog razloga je odlučeno da će se za daljnji razvoj aplikacije upotrijebiti tablet uređaj duljine dijagonale ekrana iznosa 10,5" oznake iPad, proizvođača Apple. Odabrano je i novo ime aplikacije, EHRM PRO koje sugerira aplikaciju nadograđenu značajkama za omogućavanje automatiziranog upravljanja manipulatorom.

### 3.2. Programiranje aplikacije EHROM PRO

S obzirom da se razvoj aplikacije nastavlja na uređaju Apple kompanije, korišten je isti programski paket za programiranje aplikacija kao i za mobilni uređaj, Xcode 9.3 (slika 21.) uz promjenu korisničkog sučelja na veličinu koja odgovara novoizabranom razvojnom uređaju.



Slika 21. Razvojno sučelje Xcode 9.3 programskog paketa

Xcode je programski paket koji omogućava dizajn korisničkog sučelja aplikacije te programiranje funkcija aplikacije odabirom jednog od ponuđenih programskih jezika. S obzirom na novi trend uvođenja programskog jezika Swift unutar platformi uređaja Apple, koji predstavlja nadogradnju na standardno korišten objektni C u smislu optimalnog iskorištenja hardverskih mogućnosti Apple uređaja, upravo je taj jezik odabran i za razvoj aplikacije EHROM PRO. Programiranje se vrši objektno, pri čemu se pojedinim značajkama korisničkog sučelja dodjeljuju klase pripadnosti. Svaka aplikacija se sastoji od korisničkog sučelja koje treba voditi korisnika kroz aplikaciju na jednostavan, intuitivan i pregledan način te programskog koda koji definira određene akcije koje se izvode kao reakcija na korisnikovo djelovanje. U sklopu ovog rada se neće ulaziti u same detalje programiranja aplikacije poput sintakse jer je ista vrlo opsežna i podložna promjeni s provođenjem ažuriranja programskog paketa. No, objasniti će se određeni koncepti koji su bili potrebni za osposobljavanje aplikacije

kako bi izvršavala svoju zadanu funkciju, kao što je koncept dvostrane komunikacije i problem ispravnog prijema podataka Bluetooth vezom.

### **3.2.1. Problem dvostrane komunikacije**

Bez obzira koristi li se tablet uređaj za samo praćenje i nadzor stanja manipulatora ili se ti podaci dalje analiziraju i koriste kao varijable za izračun upravljačkih naredbi, nužno je omogućiti dvostranu komunikaciju tableta i Arduino mikrokontrolera putem Bluetooth veze. A uzimajući u obzir da će se tablet uređaj koristiti u svrhu bežičnog regulatora manipulatora, važnost navedene dvostrane komunikacije je iznimna.

Za razliku od prvotne verzije aplikacije EHRM koja je podatke od mobilnog uređaja prema mikrokontroleru slala samo u trenucima kada je korisnik izvršio promjenu upravljačkih varijabli i na način da su se slale samo promijenjene vrijednosti uz distinktivnu oznaku na koju varijablu se primljena vrijednost odnosi, u sklopu aplikacije EHRM PRO je potrebno ostvariti kontinuiranu i brzu dvostranu vezu. Ta veza bi bila zadužena za brzo i pouzdano izmjenjivanje podataka između tablet uređaja i mikrokontrolera na način da bi sada mikrokontroler slao niz vrijednosti, koje predstavljaju reprezentaciju mjerenih vrijednosti senzora, tablet uređaju na temelju kojih bi aplikacija na tablet uređaju odredila upravljačke varijable za sve tri upravljane osi i prihvatnicu manipulatora s obzirom na zadani zadatak te potom prosljedila navedene varijable mikrokontroleru na izvršenje. Svaki prekid komunikacije bi ujedno značio i prekid izvođenja zadatka na način da bi se manipulator morao sigurno zaustaviti postavljanjem upravljačkih vrijednosti na nulu od strane mikrokontrolera koji bi detektirao nedostatak u komunikaciji. S obzirom na opisane situacije, nužno je da je prijenos podataka brz, pouzdan i jednostavan za interpretaciju.

Promijenivši strukturu izmjenjivanih poruka između mikrokontrolera i tablet uređaja na način da je ta struktura uvijek ista i poznata, gubi se potreba za daljnjom implementacijom distinktivnih oznaka za određivanje pridjeljenosti brojčane vrijednosti pojedinoj upravljačkoj varijabli ili pojedinom senzoru. Umjesto toga, poruka koju tablet uređaj šalje mikrokontroleru uvijek sadrži sve vrijednosti svih upravljačkih varijabli čime se po mjestu poretka zaključuje koji brojčani dio poruke se odnosi na koju varijablu, a usporedno tomu se omogućava i jednostavna primjena načina za detekciju kompromitiranosti poruke primljene putem Bluetooth veze, poput "check-sum" koncepta. Također, isti princip stalnosti poretka varijabli se koristi i

u povratnoj komunikaciji mikrokontrolera prema tablet uređaju, koji na temelju mjesta brojčane vrijednosti u poruci zaključuje na koju mjernu veličinu se ista odnosi.

Iako je poredak varijabli uvijek isti, njihov broj znamenki može varirati od jedne pa sve do četiri, s obzirom da se za analogno-digitalnu pretvorbu koristi 10-bitni A/D pretvornik u sklopu Arduino Mega 2560 kontrolera, pa sama veličina poruke u smislu broja znakova nije unaprijed poznata. Kako bi uređaji znali kada je kraj poruke, uvodi se oznaka krajnje vrijednosti u obliku slovčanog znaka koji indicira da je primljena poruka kompletna. Načelo slovčane oznake se primjenjuje i na početku same poruke, kako bi se eliminirala mogućnost da se zaprimi samo dio poruke koji sadrži ispravan krajnji znak, a bez dostatnog broja brojčanih podataka što bi moglo uzrokovati njihovu pogrešnu interpretaciju.

Uzimajući u obzir da se tablet uređaj koristi kao bežični regulator, nužno je da se izmjenjivanje poruka između tableta i mikrokontrolera odvija brzo kako bi očitane vrijednosti senzora što točnije reprezentirale trenutno stanje manipulatora na koje će regulator reagirati povratno određivanjem upravljačkog zakona. Možemo to zamisliti kao igru stolnog tenisa u kojoj se između dva uređaja izmjenjuje loptica s porukom. Naime, u igri je samo jedna loptica i ne smije se dogoditi da oba uređaja istovremeno pokušavaju poslati lopticu (poruku), već oni djeluju jedan iza drugoga, alternirajući se u ulozi primatelja i pošiljatelja. Kako bi se to ostvarilo na tehničkoj razini, nužno je odrediti vrijeme sporijeg uređaja potrebno za prijem poruke, njenu interpretaciju, reakciju na poruku te povratno slanje predviđenih podataka. Usporedivši karakteristike uređaja, teoretski i praktično, jasno je da je sporiji uređaj Arduino mikrokontroler. Stoga je za njega bilo potrebno odrediti maksimalno vrijeme potrebno za obavljanje opisanih aktivnosti kako bi se uspješno procijenilo minimalno vrijeme nakon kojeg je mikrokontroler spreman poslati aktualizirane podatke očitane s mjernih komponenti. Navedeno je učinjeno implementacijom postojećih naredbi za određivanje vremena u sklopu Arduino platforme za programiranje koji su potom ispisivani na zaslon za praćenje serijske komunikacije na način da samo ispisivanje podataka u svrhu mjerenja ne utječe na sam rezultat mjerenja. Vršanjem mjerenja se ustanovilo da bi vrijeme uzorkovanja uz dodani faktor sigurnosti trebalo iznositi između 60 i 100 ms te je za inicijalne potrebe testiranja upravo uzeta gornja navedena vrijednost. Testiranjem će se utvrditi minimalna potrebna vrijednost vremena uzorkovanja koja ostvaruje pouzdanu, a dovoljno brzu komunikaciju.

Tako se po slanju prethodne poruke od strane mikrokontrolera prema tablet uređaju vrši aktivacija mjerenja vremena na način da se zapamti trenutno vrijeme u milisekundama te se svakim prolazom glavne petlje mikrokontrolera provjerava trenutno vrijeme i razlika u odnosu



na početno. Za to vrijeme tablet uređaj vrši prijem, interpretaciju i pripremanje odgovora na poruku te njeno slanje prema mikrokontroleru u što kraćem vremenu. Mikrokontroler prima poruku po njenoj dostupnosti te ju interpretira, izvršava upravljačke naredbe i vrši očitavanja mjernih signala senzora. U slučaju da je razlika početnog i trenutnog vremena veća od 100 ms, a pretpostavljajući da je mikrokontroler obavio sve zadane radnje, ponovno se šalje poruka tablet uređaju sa aktualnim podacima senzora čime se proces ponavlja.

Ukoliko bi došlo do slučaja da mikrokontroler ne primi nikakvu poruku u dvostruko duljem vremenu od perioda slanja, mikrokontroler prepoznaje potencijalnu situaciju gubitka Bluetooth veze i postavlja sve upravljačke varijable na nulu, čime se osigurava zaustavljanje i sprečavanje nekontroliranog gibanja manipulatora unutar vremenskog intervala od 200 ms.

### ***3.2.2. Problem ispravnog prijema podataka mikrokontrolera***

Po uspješnom slanju poruke od strane mikrokontrolera, javlja se problem načina ispravnog čitanja poruke od strane tablet uređaja. Naime, za razliku od mikrokontrolera koji radi u izrazito ponavljajućem režimu rada s ciljem što češćeg i bržeg prolaska kroz glavnu petlju, aplikacija na tablet uređaju uglavnom radi na principu događaja, pri čemu se od nje očekuje reakcija na određeni korisnikov unos (tekstualni, brojčani, taktilni). S obzirom da za takvu objektivno orijentiranu aplikaciju nije svojstveno konstantno prolaženje jedne glavne petlje, a poruke putem Bluetooth veze su izrazito taktnog tipa, postavlja se pitanje načina ispravnog očitavanja tih poruka. Pri tome se ne smije dogoditi da se pojedina poruka preskoči ili da se započne s interpretacijom prije njezinog cjelovitog zaprimanja.

Jedno od mogućih rješenja, koje je i implementirano u aplikaciji EHRM PRO, se sastoji od upotrebe brojača vremena (engl. timera) koji dostizanjem određenog vremena izvršava zadanu funkciju, simulirajući time upravo takti režim rada mikrokontrolera. Princip rada ovog rješenja se temelji na poznavanju vremena između dvije poruke koji odgovara periodu slanja poruke od strane mikrokontrolera (100 ms), pri čemu se provjera za postojanjem poruke vrši deset puta češće. Poruka se smatra zaprimljenom u trenutku kada je zaprimljen i signalni znak kraja poruke uz uvjet da poruka počinje početnim slovčanim znakom. Ukoliko zaprimljena poruka ne sadrži signalni znak kraja poruke, on se očekuje u sljedećoj provjeri kada će poruka biti kompletirana. Tada funkcija obavlja spremanje poruke u string varijablu i brisanje ulaznog spremnika Bluetooth veze čime se on priprema za prijem sljedeće poruke. Ovom metodom se, u najgorem slučaju, osigurava očitavanje cjelovite poruke unutar dva ciklusa provjere (20 ms) što je dovoljno

kratko za neometan tijek razmjenjivanja poruka između tablet uređaja i mikrokontrolera sa zadanim periodom od 100 ms.

### 3.3. Upravljanje aplikacijom

Aplikacija EHROM PRO se sastoji od zaslona dobrodošlice i četiri prikaza koji se aktiviraju određenim tipkama na zaslonu.

Otvaranjem aplikacije se kratkotrajno prikazuje zaslon dobrodošlice (slika 22.).



Slika 22. Zaslon dobrodošlice aplikacije EHROM

Prvi prikaz (slika 23.) je ujedno i glavni izbornik koji služi za odabir daljnjih prikaza. Pri tome su predstavljene mogućnosti odabira ručnog ili automatskog upravljanja preko odgovarajućih tipki te su uz same tipke dani i njihovi kratki opisi. S obzirom na to, aplikacija je strukturirana na način da se u modu ručnog upravljanja omogućuje ručno pozicioniranje manipulatora i spremanje željenih točaka gibanja, dok se u prikazu automatskog upravljanja omogućuje provođenje automatskog upravljanja prema spremljenim točkama gibanja te manipulacija tim točkama gibanja i određivanje njihovih daljnjih postavki. Nadalje, iz glavnog izbornika je pritiskom na tipku *Povezivanje* moguć prelazak u prikaz za povezivanje Bluetooth vezom tableta i mikrokontrolera ili prelazak u prikaz koji sadrži detalje o samom projektu elektrohidrauličkog manipulatora, pritiskom na tipku *O projektu*.



Slika 23. Prikaz glavnog izbornika aplikacije EHRM PRO

### 3.3.1. Prikaz *Ručno upravljanje*

Pritiskom na tipku *Ručno upravljanje* otvara se istoimeni prikaz (slika 24.), koji sadrži gumbе i klizaače namijenjene za upravljanje sva tri stupnja slobode gibanja manipulatora i prihvatnicom, klizač za odabir brzine gibanja i oznake trenutnog položaja manipulatora.

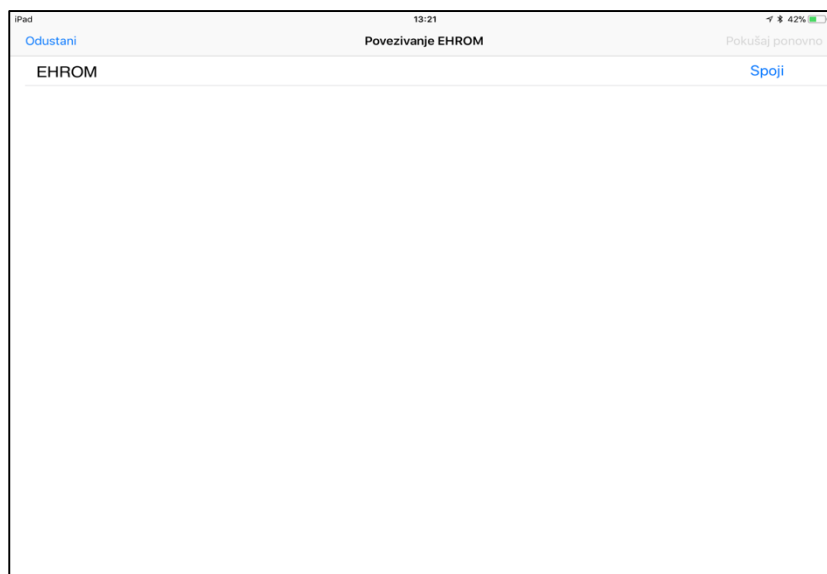


Slika 24. Prikaz ručnog upravljanja aplikacije EHRM PRO

Prvi korak ka upravljanju manipulatora preko mobilnog uređaja i aplikacije EHRM PRO se sastoji od povezivanja upravljačkog sklopa i tablet uređaja Bluetooth vezom. Navedeno se

ostvaruje pritiskom na tipku *Povezivanje* unutar glavnog izbornika ili unutar prikaza za ručno upravljanje pri čemu se prikaz aplikacije mijenja (slika 25.) te se omogućuje odabir uređaja s kojim se želi uspostaviti veza. Potrebno je odabrati uređaj naziva EHROM.

Po uspješnom povezivanju, aplikacija vraća prvotni prikaz pri čemu je tipka *Povezivanje* promijenjena u *Odspajanje*. Pritiskom na tipku *Odspajanje* se veza prekida pri čemu se status gumba ponovno mijenja u *Povezivanje*. Navedeno povezivanje i prekid postojeće veze je također moguće učiniti i pristupom preko glavnog izbornika.



**Slika 25. Zaslom povezivanja Bluetooth vezom aplikacije EHRM PRO**

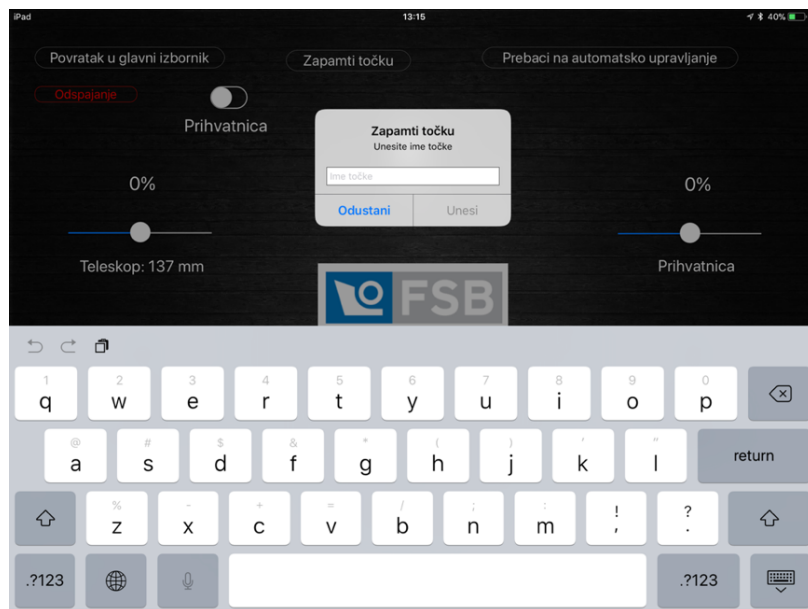
Nakon uspješnog povezivanja upravljačkog sklopa i Bluetooth modula omogućeno je upravljanje manipulatorom. Za upravljanje stupnjevima slobode gibanja manipulatora te otvaranjem i zatvaranjem prihvatnice koriste se četiri klizača, pri čemu oznaka ispod svakog klizača opisuje objekt upravljanja.

Kako bi se minimizirala mogućnost nehotičnog zadavanja upravljačkih komandi, u aplikaciju su ugrađene određene sigurnosne mjere. Za prijenos upravljačkih komandi gibanja stupnjeva slobode robota je potrebno pritisnuti tipku *SHIFT* koja mijenja boju u zelenu. Naziv tipke je odabran sukladno s uvriježenim nazivom tipke za omogućavanje gibanja u robotici. Pri puštanju svih klizača, tipka *SHIFT* se automatski vraća u isključeno stanje te je za ponovno slanje komandi nužno ponovno pritisnuti navedenu tipku. S obzirom da je ovaj manipulator namijenjen prijenosu tereta velikih masa, za aktuaciju prihvatnice je uz uključenje tipke *SHIFT* nužno aktivirati i tipku *Prihvatnica* koja po pritisku također mijenja boju u zelenu. Tek kada su aktivirane obje tipke (obje tipke su zelene) moguće je mijenjati stanje prihvatnice. Također, pri

puštanju klizača obje tipke se vraćaju u isključeno stanje, osim u slučaju ako je minimalno jedan od preostala tri klizača i dalje aktiviran. U tom slučaju tipka *SHIFT* ostaje u uključenom stanju do deaktivacije svih klizača.

Za potrebe jednostavnog i olakšanog pozicioniranja uvedena je i mogućnost promjene brzine gibanja svih osi manipulatora pomicanjem klizača s oznakom *Brzina gibanja*. Pri tome se omogućuje određivanje brzine kretanja stupnjeva slobode gibanja manipulatora u rasponu od 0 do 100 % maksimalne brzine definirane maksimalnim protokom pojedinog ventilskog segmenta bloka. Uz same oznake klizača se nalaze i trenutne vrijednosti položaja pojedinog stupnja slobode gibanja manipulatora (slika 25.).

Prikaz ručnog upravljanja, osim za pozicioniranje manipulatora, služi i za memoriranje željenih točaka gibanja manipulatora. Po dostizanju željene pozicije manipulatora korištenjem klizača na već opisani način, pritiskom na tipku *Zapamti točku* (slika 25.), sustav će izvršiti memoriranje mjernih vrijednosti senzora sva tri stupnja slobode gibanja unutar liste točaka. Pri tome je svakoj točki potrebno pridati ime (slika 26.) koje ne smije biti prazan skup ili se podudarati s već upotrijebljenim imenom. U suprotnom će aplikacija upozoriti korisnika da nije u mogućnosti spremiti zadanu točku i definirat će razlog i dati uputu kako ispraviti navedenu pogrešku. Također nije moguće spremanje točaka ukoliko nije ostvarena Bluetooth veza između tablet uređaja i manipulatora na što će aplikacija također upozoriti.



**Slika 26. Programski prozor za unos imena pri zahtjevu za spremanjem određene točke**

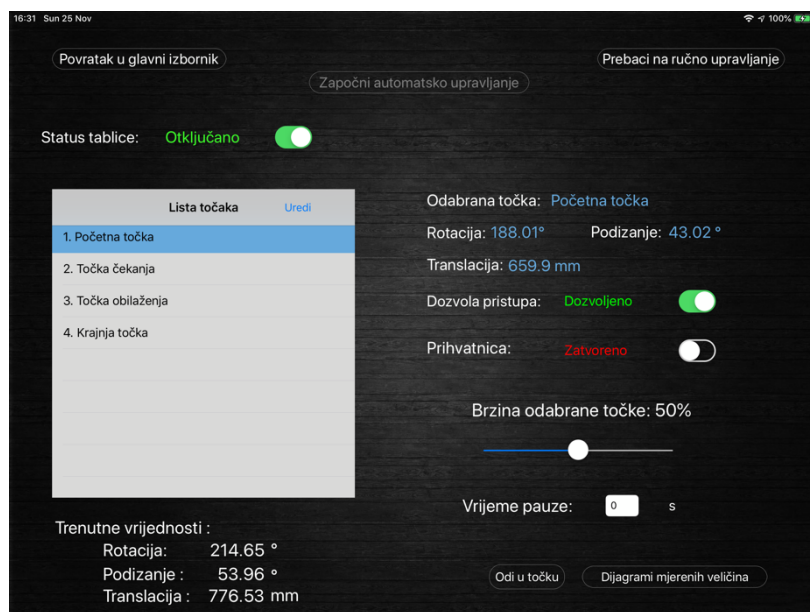
Prilikom spremanja točke, uz samu informaciju o kutu zakreta pojedine osi i produljenju translacijskog stupnja slobode gibanja, se također sprema i brzina koja je bila zadana tijekom pritiska tipke za spremanje točke. S obzirom da trenutno ne postoji mogućnost detekcije stanja

prihvatnice, iz sigurnosnih razloga je osnovna pretpostavka prilikom spremanja točke da je željeno stanje prihvatnice zatvoreno. Korisnik u prikazu automatskog upravljanja može, prema potrebi, odrediti drugačije stanje prihvatnice.

Nakon spremanja svih željenih točaka gibanja manipulatora potrebno je pritisnuti tipku *Prebaci na automatsko upravljanje* čime se prikaz aplikacije mijenja iz ručnog u automatski režim rad.

### 3.3.2. Prikaz Automatsko upravljanje

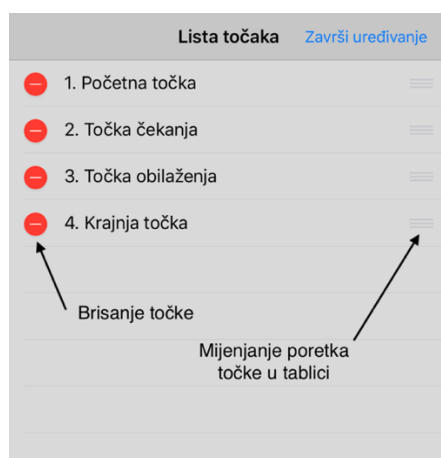
Prikaz aplikacije naziva *Automatsko upravljanje* (slika 27.), služi za definiranje i izvođenje gibanja manipulatora u automatskom režimu rada. U navedenom prikazu je omogućen pregled memoriranih točaka, modificiranje navedene liste te mijenjanje postavki za svaku pojedinačnu točku u tablici naziva *Lista točaka*, vidljivoj na navedenoj slici prikaza zaslona. Navedni prikaz također pruža i mogućnost uvida u trenutno stanje upravljanih koordinata.



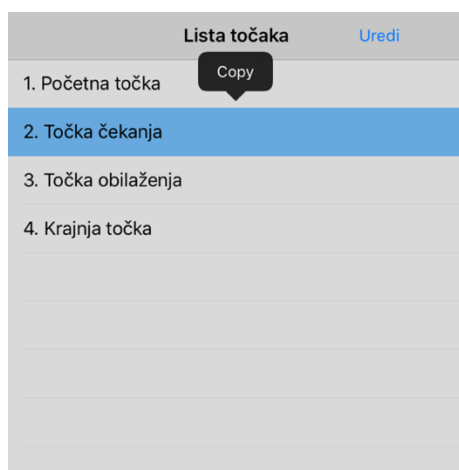
Slika 27. Prikaz zaslona automatskog upravljanja aplikacije EHRM PRO

Točke su unutar liste navedene po poretku njihovog dodavanja, a taj poredak ujedno predstavlja i redoslijed izvršenja točki od strane manipulatora. Putem tablice je omogućena manipulacija točkama na način da se one mogu premještati, brisati ili duplicirati. Pri tome je za omogućavanje funkcija premještanja i brisanja potrebno pritisnuti tipku *Uredi* koja se nalazi uz naslov same tablice. Time dolazi do promjene izgleda tablice kao što je to prikazano na slici 28. Brisanje pojedine točke iz tablice se odvija pritiskom na crveni krug te naknadnom potvrdom brisanja, dok se premještanje odvija povlačenjem određenog retka za oznaku koja se sastoji od tri paralelne, horizontalne linije prema željenom mjestu u tablici. Po završetku

uređivanja, za povrat u normalni prikaz tablice je potrebno pritisnuti tipku *Završi uređivanje*. Dupliciranje točaka se odvija na način da se u normalnom prikazu tablice izvrši dulji pritisak na točku koju želimo duplicirati, pri čemu se na njoj pojavljuje balončić s oznakom *Copy* (slika 29.). Pritiskom na navedeni balončić se u listi na mjestu ispod mjesta originalne točke, pojavljuje novi redak koji je kopija originalne točke. Potom se već opisanom metodom može izvršiti premještanje kopirane točke na željenu poziciju u tablici (slika 30.). Pri tome se ne zadržava nikakva povezanost duplicirane i izvorne točke, odnosno promjena postavki jedne točke neće utjecati na promjenu postavki druge točke iako su istog naziva.



Slika 28. Prikaz tablice točaka prilikom pritiska tipke *Uredi*



Slika 29. Prikaz tablice točaka prilikom duljeg pritiska određenog retka tablice



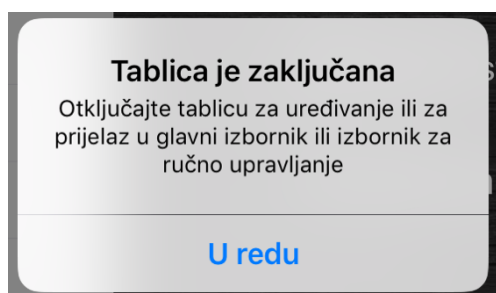
Slika 30. Prikaz tablice točaka nakon dupliciranja točke i njenog premještanja na željenu poziciju u tablici

Pritiskom bilo koje točke unutar tablice se desno od tablice pokazuju svi podaci vezani uz tu točku koji se također mogu u određenoj mjeri i modificirati. Dostupne informacije, prikazane za primjer točke naziva Početna točka, se mogu vidjeti na slici 27. Osnovna informacija vezana uz svaku točku se sastoji od imena točke i prikaza reference svaka od tri stupnja slobode gibanja.

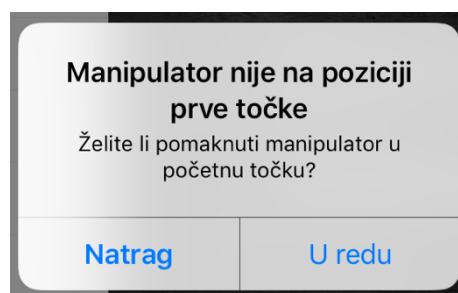
Nadalje, za svaku točku se putem prekidača uz oznaku *Status prihvatnice* može odrediti stanje prihvatnice koje je potrebno ostvariti prilikom dostizanja navedene točke. Također je moguće odrediti, kroz tipku dozvole pristupa, treba li se promatrana točka preskočiti prilikom sljedećeg pokretanja režima automatskog upravljanja. Time se omogućuje preskakanje određenih točki u planu gibanja, ovisno o želji operatera, bez potrebe za njezinim brisanjem iz tablice. Bitne značajke svake točke koje se nadalje mogu definirati su brzina gibanja manipulatora prilikom gibanja prema zadanoj točki, u intervalu od 0 % do 100 % maksimalne brzine pojedinog stupnja slobode gibanja i vrijeme pauze u kojemu će manipulator mirovati nakon postizanja zadane točke.

Pritiskom na tipku *Odi u točku* će aplikacija postaviti upit je li korisnik namjerno pokrenuo pomicanje manipulatora u točku koja je trenutno označena u listi točaka te će po potvrdnom odgovoru izvršiti gibanje manipulatora u zadanu točku poštujući zadane postavke navedene točke vezane uz brzinu i stanje prihvatnice.

Prilikom pokretanja automatskog upravljanja manipulatora je nužno osigurati da ne može doći do promjene točaka prilikom samog izvođenja programa. To se osigurava zaključavanjem tablice putem tipke *Zaključaj tablicu* čime se onemogućuje promjena postavki točaka u tablici ili njihovo brisanje, premještanje i dupliciranje. Nemogućnost promjene je sugerirana sivom bojom značajki, a u slučaju da operater pokuša promijeniti što god, pojavit će se i upozorenje da nije moguće vršiti promjene dok je tablica zaključana (slika 31.)



**Slika 31. Obavijest aplikacije da uređivanje točaka nije moguće ako je tablica točaka zaključana**



**Slika 32. Obavijest aplikacije da manipulator, prilikom pokretanja automatskog upravljanja, nije na poziciji prve točke**

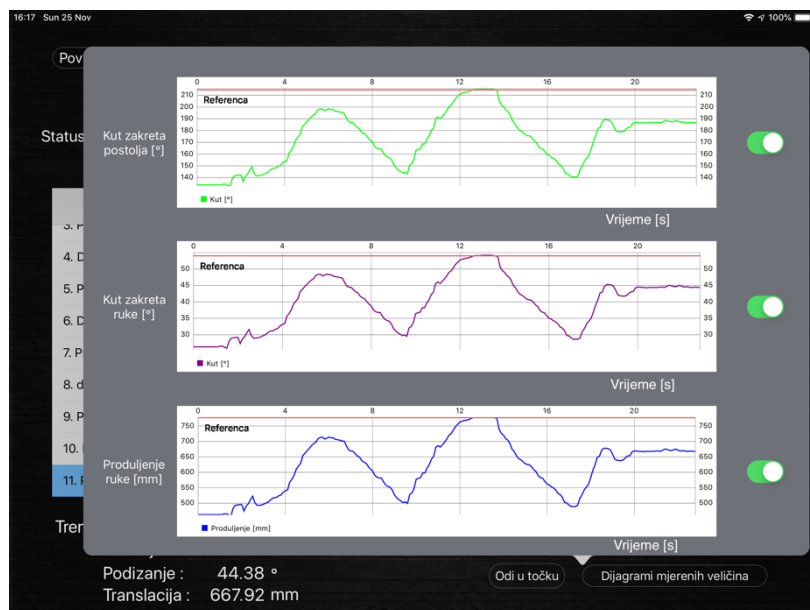
Također je tijekom perioda kada je tablica točaka zaključana, onemogućen povratak u glavni izbornik aplikacije ili prebacivanje prikaza u režim ručnog upravljanja. Po zadovoljenju navedenog uvjeta, automatsko upravljanje se pokreće pritiskom na tipku *Započni automatsko upravljanje*. Pri tome, ukoliko se manipulator trenutno ne nalazi u prvoj točki tablice, aplikacija



postavlja upit želi li se izvršiti premještanje manipulatora u početnu točku i naknadni početak automatskog upravljanja manipulatorom (slika 32.).

Odvijanje automatskog upravljanja je predviđeno na način da aplikacija zadaje upravljačke naredbe s obzirom na tri stupnja slobode gibanja, ostvarujući gibanje manipulatora sukladno poretku točaka u tablici te poštujući zadane postavke svake točke. U trenutcima kada se manipulator nalazi u određenoj točki, ona je posebno istaknuta unutar tablice. Prilikom dolaska u zadnju točku navedenu u tablici, predviđeno je ponavljanje ciklusa do prekida automatskog upravljanja od strane operatera. Prilikom započinjanja automatskog režima rada se također i naziv tipke za pokretanje mijenja u *Završi automatsko upravljanje* čime se sugerira da je automatsko upravljanje u tijeku. Pritiskom na navedenu tipku se u bilo kojem trenutku završava proces automatskog upravljanja pri čemu se manipulator sigurno zaustavlja.

Praćenje rada manipulatora je omogućeno prikazom mjernih veličina sva tri stupnja slobode gibanja putem dijagrama dostupnih na prekrivajućem zaslonu koji se aktivira pritiskom na tipku *Dijagrami mjernih veličina* ( ).



**Slika 33. Prikaz mjernih veličina na dinamičkim dijagramima tijekom testiranja funkcionalnosti aplikacije**

Dijagrami su dinamički, pri čemu se vrijednosti osi prilagođavaju trenutnim iznosima varijabli. Time se os apscise, dinamički prilagođava proteklom vremenu gibanja manipulatora, dok se raspon vrijednosti na osi ordinate određuje s obzirom na početnu vrijednost mjerne varijable prilikom započinjanja gibanja u određenu točku i referentne vrijednosti točke za svaki od stupnjeva slobode gibanja. Omogućeno je i zaustavljanje osvježavanja svakog pojedinog

dijagrama pritiskom na tipku na desnom dijelu prikaza, nakon čega se podaci dijagrama mogu detaljnije analizirati povlačenjem dijagrama prstom te uvećavanjem dijagrama pomicanjem dva prsta.

Na slici 33. su prikazane krivulje koje odgovaraju pomaku potenciometra spojenog na Arduino mikrokontroler koji je ručno pokretan i time korišten kao simulacija rada manipulatora. Prikaz realnih dijagrama je dan u poglavlju 5. u kojemu su prikazani dijagrami ostvareni primjenom osmišljenog načina upravljanja, danog u poglavlju 4.

### **3.3.3. Prijenos podataka Bluetooth vezom**

Prijenos upravljačkih komandi se, kako je već spomenuto, odvija putem Bluetooth veze. Za tu svrhu se koristi HM-10 Bluetooth modul koji je izravno povezan na Arduino mikrokontroler. Zadavanje upravljačkih naredbi se odvija periodičnim slanjem poruke poznatog formata, koja se sastoji od slovočane oznake početka poruke koju nastavljaju četiri brojeve vrijednosti međusobno odvojene zarezom, dok je kraj poruke također označen slovočanim znakom. U nastavku je dan okvirni oblik poruke pri čemu su brojeve vrijednosti zamijenjene oznakom ovisno o tome na koji se stupanj slobode gibanja odnose ili o tome odnose li se na prihvatnicu, dok je slovočana oznaka početka poruke reprezentirana slovom "A", a slovočana oznaka kraja poruke slovom "Y". Prema tome je okvirni oblik poruke sljedeći:

**A,komanda\_rotacije,komanda\_podizanja,komanda\_translacije,komanda\_prihvatnice,Y**

Četiri brojeve vrijednosti pripadaju skupu cijelih brojeva iz zatvorenog intervala između -100 i 100, a određuju brzinu akтуiranja pojedinog stupnja slobode. Negativne vrijednosti se odnose na akтуaciju u obrnutom smjeru od one za pozitivne vrijednosti dok nula predstavlja zahtjev za mirovanjem. S obzirom da je poruka poznatog formata, Arduino mikrokontroler vrši primanje poruke na način da koristi nebrojčanu vrijednost, zarez, u svrhu separatora brojčanih vrijednosti. Time se po dostupnosti poruke u spremniku serijske veze, vrši spremanje znakova poruke do očitavanja zareza, pri čemu se dotad primljeni dio poruke sprema u varijablu koja odgovara redoslijedu očitanoг broja. Zarez se kao separator zanemaruje u smislu pridjeljivanja varijabli te se nastavlja spremanje brojčanih znakova do sljedećeg zareza koji se potom spremaju u sljedeću varijablu po redu. Po očitavanju slovočane oznake kraja poruke, dozvoljava se izlazak mikrokontrolera iz petlje čitanja poruke čime se omogućuje mapiranje vrijednosti

spremljenih u varijable u odgovarajuće komande pulsno-širinske modulacije pojedinog stupnja slobode gibanja i prihvatnice.

Povratna poruka od mikrokontrolera prema tablet uređaju sadrži očitane vrijednosti mjernih senzora kojima je manipulator opremljen, pri čemu su vrijednosti navedene u formi brojeva u intervalu između 0 i 1023, s obzirom na primjenu Arduino mikrokontrolera za očitavanje vrijednosti koji koristi 10-bitni analogno-digitalni pretvornik ( $2^{10} = 1024$ ). Poruka je također strukturirana na sličan način kao i već razmatrana poruka s upravljačkim naredbama, pri čemu je primatelju ponovno poznata struktura poruke. U slučaju povratne poruke, razlika se očituje u veličini same poruke i krajnjoj slovčanoj oznaci. Naime, manipulator sadrži osam mjernih senzora (dva rotacijska davača, potezni potencijometar, četiri senzora tlaka i senzor sile) što znači da se poruka sastoji od osam brojčanih vrijednosti razdijeljenih zarezom, dok je oznaka kraja poruke slovo "N". Slovčana oznaka "A" je ponovno upotrebljena za oznaku početka poruke. Prijam poruke se također razlikuje od načina prijema poruke od strane mikrokontrolera, na način kako je to već objašnjeno u potpoglavlju 3.2.2.

### 3.3. Programiranje Arduino mikrokontrolera

S obzirom na promijenjenu strukturu poruka u odnosu na prvotnu EHRM aplikaciju [1] i potrebu za omogućavanjem povratnog toka poruka prema tablet uređaju, nužno je bilo izvršiti adekvatnu promjenu programa Arduino mikrokontrolera.

Promjena u prijemu poruke je opisana u prethodnom potpoglavlju, dok je sam kod programa moguće vidjeti u prilogu na CD-R mediju. Jedna od daljnjih razlika u načinu izvođenja programa u odnosu na prvotnu verziju je u korištenju serijske komunikacije Arduino mikrokontrolera putem istaknutih pinova za komunikaciju s oznakama Tx i Rx, za razliku od upotrebe SoftwareSerial metode u prvotnoj ideji. Naime, primjena SoftwareSerial metode je znatno sporije obavljala dvostranu komunikaciju u usporedbi sa serijskom komunikacijom preko Tx i Rx pinova.

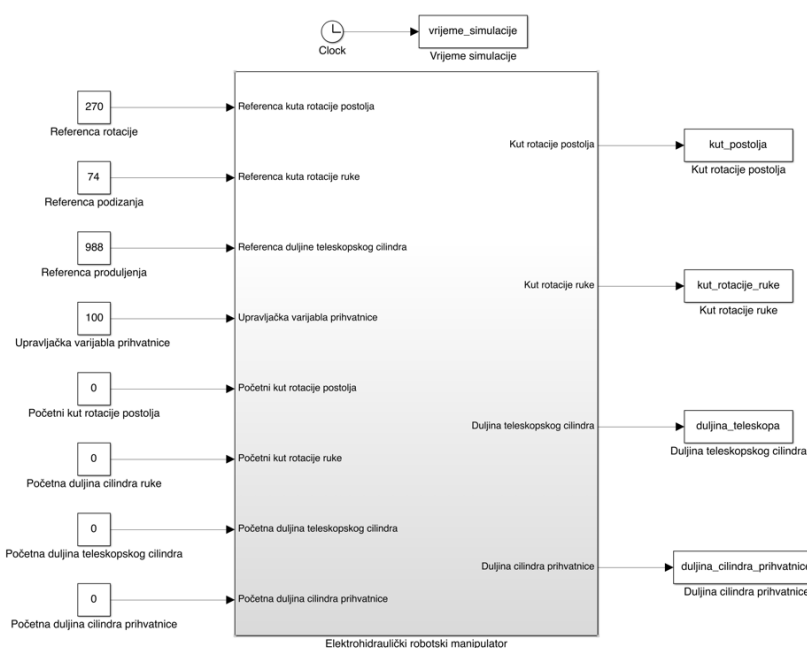
Dodatno je bilo nužno osigurati i mogućnost sigurnog zaustavljanja manipulatora u slučaju gubitka komunikacije s tablet uređajem kako bi se eliminirala pojava nekontroliranog gibanja manipulatora kao što je već objašnjeno u potpoglavlju 3.2.1.

Nadalje, prilikom početnog testiranja očitavanja mjernih veličina sa senzora pojedinog stupnja slobode gibanja je uočeno kako očitana vrijednost titra oko stvarne vrijednosti za otprilike deset jedinica analogno-digitalnog pretvarača. S obzirom da je period slanja podataka o mjernim

veličinama puno veći od samog vremena prolaska mikrokontrolera kroz petlju očitavanja mjernih veličina, provelo se uprosječivanje izmjerenih vrijednosti očitanih između dva vremenska trenutka slanja. Time se uvelike eliminirala nasumična promjena očitanih vrijednosti koja bi bila vrlo nepogodna za određivanje upravljačke varijable tijekom gibanja manipulatora, pogotovo u trenucima približavanja zadanom referentnom položaju. Navedenim postupkom se titranje mjerne veličine smanjilo na razinu jedne jedinice analogno-digitalnog pretvornika što je zadovoljavajuće.

## 4. SIMULACIJSKI MODEL EHRM-a

U ovom poglavlju rada je predstavljen simulacijski model regulacije pojedinog stupnja slobode gibanja elektrohidrauličkog robotskog manipulatora te upravljanja prihvatnicom (slika 34.). S obzirom da sustav nema mogućnost određivanja je li prihvatnica zatvorena, otvorena ili u nekom položaju između ta dva krajnja, ne postoji mogućnost regulacije tog dijela sustava manipulatora već je omogućeno samo njeno upravljanje.



Slika 34. Simulacijski model elektrohidrauličkog robotskog manipulatora

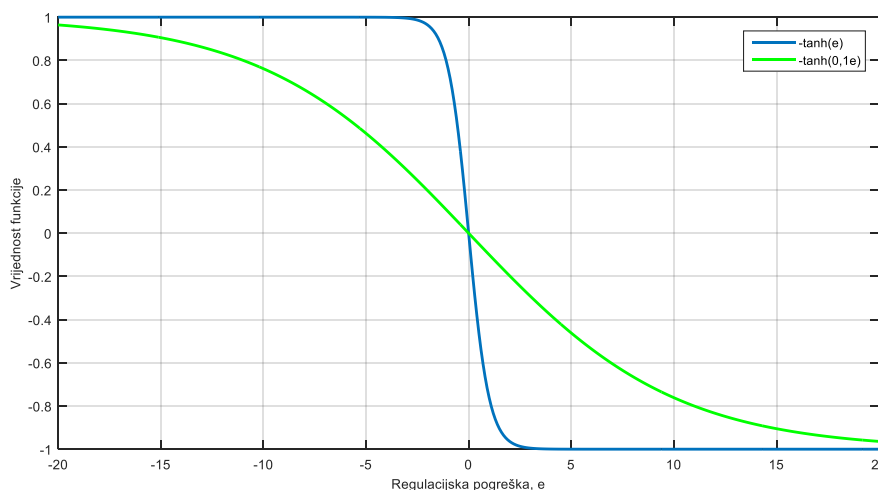
Model je predstavljen u obliku pregledne forme, grupiranjem pojedinih cjelina u podsustave. Time je cjelokupni simulacijski model sustava predstavljen jednim blokom s istaknutim ulaznim i izlaznim varijablama, dok je za detalje modela potrebno daljnje otvaranje kreiranih blokova koji sačinjavaju glavni blok modela sustava. Svi podsustavi koji čine simulacijski model će biti objašnjeni u nastavku poglavlja.

Sama svrha simulacijskog modela je određivanje izlaznih varijabli sustava za proizvoljne ulazne zahtjeve s ciljem određivanja odziva sustava i načina njegova ponašanja u raznim režimima rada pri čemu je nužno ostvariti dobre performanse sustava u svim njegovim radnim uvjetima.

### 4.1. Odabir prikladnog regulatora EHRM-a

Prije same prezentacije simulacijskog modela pojedinog stupnja slobode gibanja, potrebno je objasniti primijenjenu vrstu regulatora koja je implementirana u navedenim modelima. S

obzirom da razvijeni robotski manipulator spada u skupinu složenih, nelinearnih sustava s realnim komponentama [8], jasno je da klasični linearni regulatori neće zadovoljiti zahtjeve u svim režimima rada manipulatora. Imajući na umu veliko radno područje i raspon mjernih veličina, ne možemo očekivati da će takvi tipovi regulatora zadovoljiti zahtjeve za dobrim performansama u režimu malih i velikih signala referenci bez određenih nepogodnih pojava. Te se pojave primjerice mogu sastojati od naglog kretanja i trzaja manipulatora prilikom manipulacije radnim predmetom u režimu velikih signala za pojačanja određena za režime malih signala. S druge strane pri podešenju sustava za režime velikih signala, u slučaju režima male greške regulacije, sustav će trebati puno više vremena za odrađivanje navedenog zadatka zbog vrlo malih upravljačkih varijabli koje su uzorkovane malom regulacijskom pogreškom. Intuitivno je za osnovu regulatora odabrana funkcija  $-\tanh(e)$ , prikazana na slici 35., s obzirom na njenu čestu primjenu u ulozi nelinearnog regulatora, gdje varijabla  $e$  predstavlja regulacijsku pogrešku. Prednost navedene funkcije je da ima stabilizirajuće djelovanje i pruža asimptotsku točnost. Naime, zbog svoga oblika kojim djeluje uvijek suprotno od smjera povećanja regulacijske pogreške ona sustav dovodi u nulu (referentno stanje) u oba slučaja predznaka pogreške.



Slika 35. Prikaz funkcije  $-\tanh(e)$  i  $-\tanh(0,1e)$  na intervalu  $[-20,20]$

Elektrohidraulički robotski manipulator je razvijen u formi djelomično mobilnog robota koji se prilikom svoje neaktivnosti može premjestiti na neku drugu radnu lokaciju. Naime, manipulator je preko pokretnih kotača oslonjen na podlogu, dok mu u radnom periodu dodatnu stabilnost pružaju rasklopivi upornici. No, unatoč tim upornicima, a imajući u vidu da je manipulator u mogućnosti nositi terete velikih masa do 200 kg, postoji opasnost od oštećenja manipulatora ili njegove okoline te pojave velike buke i vibracija u slučaju naglih pokreta ruke manipulatora. S

tim na umu, predloženi regulator mora moći provesti zalijetanje gibanja pojedinog stupnja slobode manipulatora bez ili uz minimizirane trzaje. Imajući na umu navedeni zahtjev, možemo uočiti da upravo u slučaju početka gibanja bi sam  $-\tanh(e)$  dao maksimalnu vrijednost upravljačke varijable bez umjerenog zalijetanja sustava što bi prouzrokovalo upravo prethodno opisani, neželjeni efekt.

Kako bi se doskočilo navedenom problemu, a zadržao inače pogodni oblik regulatora u smislu funkcije  $-\tanh(e)$ , pristupilo se modifikaciji navedene funkcije. Pri tome je u obzir uzeta ideja sprege dva regulatora bazirana na navedenoj funkciji koji bi u početnom dijelu gibanja, kada je vrijednost funkcije  $-\tanh(e)$  nepovoljna zbog trzaja, djelovali antagonistički. Pri tome bi se poništavalo naglo djelovanje samo jednog regulatora u početnom dijelu gibanja. S obzirom da predložena  $-\tanh(e)$  funkcija ima povoljnu karakteristiku blagog završetka u nuli, što se događa pri kraju gibanja kada regulacijska pogreška počne težiti nuli, nužno je zadržati tu karakteristiku unatoč uzajamnom djelovanju dvaju regulatora. Pri tome je potrebno istaknuti kako se naziv dva regulatora koristi s obzirom na prikaz navedenog regulatora u simulacijskom modelu (slika 36.), u kojemu su navedene dvije funkcije predstavljene odvojenim blokovima. S obzirom na sva navedena opažanja, predlaže se sljedeća struktura regulatora. Upotrijebit će se dva jednaka regulatora pri čemu djelovanje pojedinog regulatora  $f_r$  u ovisnosti o regulacijskoj pogrešci  $e$ , ovisi na sljedeći način:

$$f_r = -100 \cdot \tanh(A \cdot e), \quad (4.1)$$

gdje je  $A$  jedan od parametara regulatora koji određuje ponašanje sustava u blizini referentne točke, odnosno definira način na koji će se pojedini stupnjevi slobode gibanja zaustaviti u referentnoj poziciji. Koeficijent 100 predstavlja faktor skaliranja djelovanja regulatora na već, u prethodnom poglavlju, opisani raspon upravljačkih varijabli u rasponu od -100 do 100, s obzirom da je funkcija  $-\tanh(e)$  omeđena unutar intervala  $[-1,1]$ . Navedena dva identična regulatora su postavljena u antagonistički odnos, pri čemu se on definira kao razlika njihova djelovanja uz skaliranje vrijednosti jednog od regulatora množenjem njegovog izlaza s faktorom praćenja  $P$ . Navedeno se može predstaviti sljedećim izrazom:

$$F_r = f_r - P \cdot f_r = (1 - P) \cdot f_r, \quad (4.2)$$

gdje je  $F_r$  ukupno regulacijsko djelovanje dvaju regulatora.

Faktor praćenja se definira u osnovi kao parametar koji određuje koliko će vrijednost oponirajućeg regulatora umanjivati vrijednost drugog regulatora, s ciljem da to umanjeње u početnom trenutku gibanja uzrokuje malu resultantnu upravljačku varijablu, odnosno da se izlazi dvaju regulatora, koji se oduzimaju, malo razlikuju. Takvim ponašanjem se dobiva gotovo tangencijalni odnos krivulje odziva varijable sustava i horizontalne osi, čime se osigurava željena karakteristika pokretanja sustava. Princip djelovanja faktora praćenja je da ovisno o faktoru nezavršenosti gibanja određuje kašnjenje jednog regulatora u odnosu na drugi, mijenjajući time konačni iznos upravljačke varijable.

Faktor nezavršenosti gibanja  $\rho$  definiramo kao apsolutnu vrijednost omjera trenutne ("preostale") pogreške regulacije i regulacijske pogreške u početnom trenutku, definirane referencom  $\alpha_r$ , početnim položajem  $\alpha_{0,r}$  i trenutnoj vrijednosti regulirane varijable  $\alpha$  prema sljedećem izrazu:

$$\rho = \frac{|\alpha_r - \alpha|}{|\alpha_{0,r} - \alpha_r|} = \left| \frac{\alpha_r - \alpha}{\alpha_{0,r} - \alpha_r} \right|. \quad (4.3)$$

Sukladno navedenom izrazu, faktor nezavršenosti gibanja je bezdimenzijska veličina koja se za asimptotsko ponašanje sustava kreće u realnom intervalu  $[0,1]$ .

Navedeni faktor je potrebno umanjiti za početni faktor razlike praćenja  $C$ , koji sprječava zaglavljivanje sustava u stanju definiranom u početnom trenutku u kojemu je faktor nezavršenosti gibanja 1 i koji određuje upravo maksimalnu početnu upravljačku vrijednost kojom se započinje gibanje pojedinog stupnja slobode gibanja.

Prema tome, sam faktor praćenja  $P$  se računa na sljedeći način:

$$P = \rho^B - C, \quad (4.4)$$

odnosno:

$$P = \left| \frac{\alpha_r - \alpha}{\alpha_{0,r} - \alpha_r} \right|^B - C, \quad (4.5)$$

gdje je  $B$  parametar podešenja željene karakteristike početnog odziva ( $B \geq 1$ ) koji određuje brzinu smanjenja anatagonističkog utjecaja oponirajućeg regulatora. Pri tome je za veće vrijednosti parametra  $B$ , vrijeme ubrzavanja sustava manje, odnosno upravljačke varijable u početnom dijelu gibanja brže dostižu svoje ekstreme.



Kako bi se osiguralo da se, u određenim trenucima kada je početni faktor razlike praćenja  $C$  veći od samog izraza  $\rho^B$ , spriječi protagonističko djelovanje dvaju regulatora, nužno je ograničiti faktor praćenja  $P$  s donje strane na nulu. Time se osigurava da se u određenom trenutku antagonističko djelovanje regulatora isključuje, čime osnovni regulator preuzima potpunu ulogu u određivanju upravljačke varijable s ciljem ostvarenja točnosti regulacije.

Konačno, cjelokupno regulacijsko djelovanja  $F_r$  je predstavljeno sljedećim izrazom:

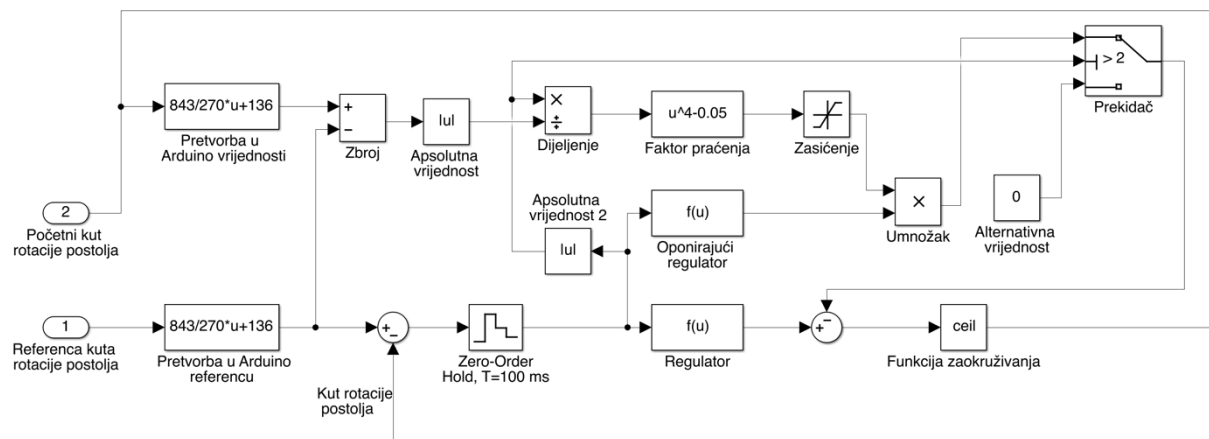
$$F_r = (1 - P) \cdot f_r = \left( 1 - \frac{|\alpha_r - \alpha|}{|\alpha_{0,r} - \alpha_r|} + C \right) \cdot [-100 \cdot \tanh(A \cdot e)], \quad (4.6)$$

odnosno

$$F_r = -100 \cdot \left( 1 + C - \frac{|\alpha_r - \alpha|}{|\alpha_{0,r} - \alpha_r|} \right) \cdot \tanh(A \cdot e), \quad (4.7)$$

uz uvjet da za  $P < 0$  vrijedi da se u izraz 4.6. uvrštava nula umjesto vrijednosti varijable  $P$ .

Simulacijski model navedenog regulatora je prikazan za primjer upravo prvog stupnja slobode gibanja manipulatora (slika 36.). Pri tome je tekstualno opisan i kroz izraze predstavljen regulator preveden u blokovsku formu simulacijskog modela.



**Slika 36. Simulacijski model predloženog regulatora prikazanog za primjer prvog stupnja slobode gibanja manipulatora**

Regulatori u antagonističkom djelovanju prema izrazu (4.2) su označeni blokovima naziva *Regulator* i *Oponirajući regulator*, dok je faktor praćenja određen u istoimenom bloku pri čemu je parametar podešenja početne karakteristike odziva  $B = 4$  i faktor početne razlike praćenja  $C = 0,05$ , za primjer prvog stupnja slobode gibanja.

Dodatni blok naziva *Prekidač* je dodan kako bi se u slučaju vrlo malih zahtjeva pomaka (u navedenom primjeru za pomake manje od  $2^\circ$ ) isključilo djelovanje oponirajućeg regulatora. U slučaju tako malih signala promjene stanja sustava, ne može doći do trzaja, a značajno bi se produljilo vrijeme dostizanja referentne pozicije u slučaju uključenog antagonističkog djelovanja regulatora.

Podešavanje parametara regulatora je moguće napraviti eksperimentalno ili simulacijom imajući na umu utjecaje pojedinog parametra na sam odziv sustava. Temeljite smjernice za određivanje parametara nadilaze opseg ovog rada te se ovdje neće razmatrati, već će biti dane kvalitativne smjernice načina podešavanja parametara regulatora.

Pri tome će parametar  $A$  iz izraza (4.7) utjecati na ponašanje sustava pri kraju gibanja, određujući time način dolaska sustava u stacionarno stanje. Za veće iznose parametra  $A$  će sustav kasnije početi usporavati nego što bi to učinio za manje iznose parametra (slika 35.). Pri tome vidimo da funkcija  $-\tanh(e)$  smanjuje svoju vrijednost prema nuli dostizanjem puno manje regulacijske greške nego što je to slučaj kod funkcije  $-\tanh(0,1 \cdot e)$ , što znači da će funkcija s manjim iznosom parametra  $A$  izvršavati zaustavljenje pojedinog stupnja slobode gibanja s manjom akceleracijom.

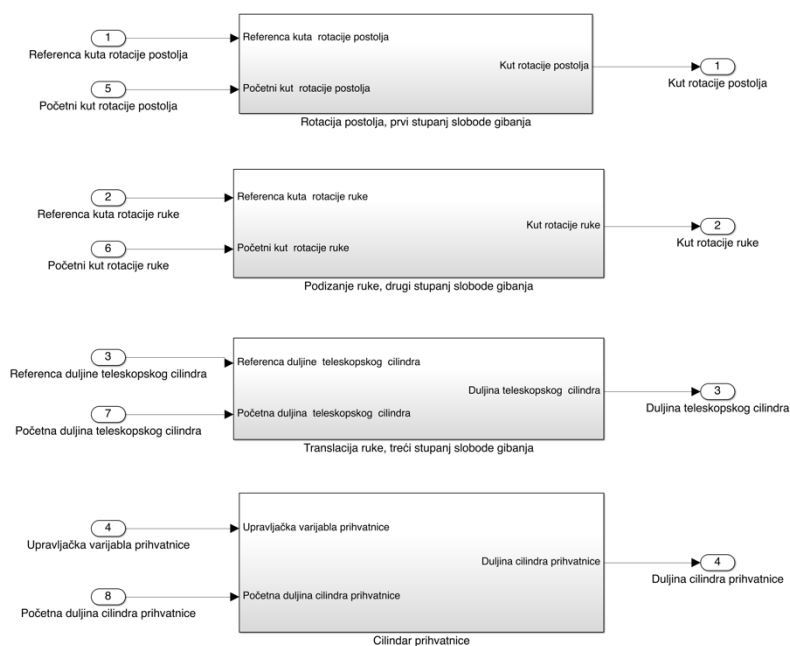
Parametri  $B$  i  $C$  služe za podešavanje oblika odziva sustava u početnom dijelu gibanja sustava. Pri tome parametar  $C$  određuje djelovanje regulatora u trenutku početka gibanja ( $t = 0$ ) na način da za manji  $C$  postoji manja razlika između djelovanja dva regulatora što znači da je njihova razlika također manja, dok veći iznos parametra  $C$  uzrokuje veće inicijalno djelovanje ukupnog regulatora. Također, smanjenjem parametra  $C$ , uz fiksni parametar  $B$ , se sustav usporava jer se djelovanje osnovnog regulatora više reducira oponirajućim regulatorom, dok se u suprotnom slučaju povećanja parametra  $C$  sustav ubrzava.

Parametar  $B$  omogućuje da se parametar  $C$  smanji na željenu vrijednost kako bi se ostvarilo željeno inicijalno djelovanje regulatora, uz kompenzaciju gubitka brzine odziva. Naime povećanjem parametra  $B$ , faktor nezavršenosti gibanja se sve brže smanjuje, čime se i trajanje redukcije brzine gibanja, odnosno vrijeme zalijetanja, smanjuje.

Glavna prednost, a i jedan od bitnih razloga zbog kojih se pristupilo razvoju ovog regulatora je mogućnost njegove lagane programske aplikacije, pri čemu nije potrebno koristiti vremenske članove za ostvarenje kontroliranog ubrzanja i usporenja individualnih stupnjeva slobode gibanja.

## 4.2. Primarni podsustav simulacijskog modela EHRM-a

Podsustav koji prikazuje slika 37. se krije unutar bloka prikazanog na slici 34. Pri tome su istaknuta četiri daljnja bloka koji predstavljaju tri stupnja slobode gibanja manipulatora te blok upravljanja prihvatnicom manipulatora.



Slika 37. Primarni podsustav simulacijskog modela EHRM-a

U sklopu ovog podsustava je jasno naznačena neovisnost gibanja pojedinog stupnja slobode gibanja i prihvatnice što je vrlo pozitivna karakteristika omogućena pravilnim odabirom ventilske grupe i dimenzioniranjem sustava. Sama struktura modela je načinjena na način da svojim redoslijedom na slici 37. sugerira i sam redoslijed komponenti na realnom manipulatoru. U nastavku će biti dani podmodeli svakog pojedinačnog bloka prikazanog na prethodno navedenoj slici. Pri tome se referenca svakog sustava promatra u smislu da ona potječe od samog operatera koji ju unosi na već opisani način putem aplikacije na tablet uređaju, odnosno od strane same aplikacije tijekom režima automatskog upravljanja. Regulacijska pogreška, predstavljena razlikom zadane reference položaja i trenutnog položaja određenog stupnja slobode gibanja, predstavlja ulaz u regulator koji zadaje upravljačku varijablu na jednak način kako bi to bilo u ručnom režimu rada, odnosno zadavanjem upravljačke komande u intervalu od -100 do 100 za svaki pojedini stupanj slobode gibanja. Sukladno upravljačkoj varijabli određene samim regulatorom, određuje se protok ulja uzrokovan njome, djelovanjem na sam ventilski segment. Za to je potrebno upotrijebiti dvije mape pri čemu će se prvo provesti preslikavanje vrijednosti upravljačke varijable određene regulatorom u napon na samom ventilu

(dano u potpoglavlju 2.1.3), nakon čega će se iz te vrijednosti napona određivati protok ulja kroz pojedini ventilski segment s obzirom na karakteristiku određenu u potpoglavlju 2.1.1. Vrijedi ponoviti kako su navedene mape određene eksperimentalno na samom manipulatoru. Pri tome mapa preslikavanja vrijednosti upravljačke varijable određene regulatorom u vrijednost napona na upravljačkom ulazu ventilskog segmenta vrijedi za primijenjenu, samostalno izrađenu i trenutno ugrađenu pločicu.

#### 4.2.1. Podsustav prvog stupnja slobode gibanja

Prvi stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja rotaciju čitave ruke manipulatora oko vertikalne osi definirane centrom rotacije pužnog kola. Aktuacija sustava se vrši hidromotorom specifičnog volumena  $V_{m,spec} = 36 \text{ cm}^3$ , čija je brzina vrtnje reducirana primjenom pužnog vijka s kolom, prijenosnog omjera  $i = 50$ .

Za simulaciju sustava rotacije postolja je nužno odrediti povezanost upravljačke varijable i brzine vrtnje samog postolja. Pri tome se, kako je već navedeno, upotrebljavaju dvije mape kojima se vrijednost upravljačke varijable prvog stupnja slobode gibanja  $u_1$ , preslikava u protok ulja kroz hidromotor  $Q_m$ . Iz navedenog protoka i poznavanjem specifičnog volumena hidromotora  $V_{m,spec}$ , brzinu vrtnje hidromotora  $n_m$  je moguće odrediti prema sljedećem izrazu:

$$n_m = \frac{1000 \cdot Q_m}{V_{m,spec}} [1/\text{min}] , \quad (4.8)$$

pri čemu je protok ulja  $Q_m$ , sukladno mapi ventilskog bloka, potrebno unijeti u mjernoj jedinici L/min. Poznavajući brzinu vrtnje hidromotora  $n_m$  i prijenosni omjer pužnog para  $i$ , moguće je odrediti samu brzinu vrtnje prvog stupnja slobode gibanja manipulatora  $n_{SSG1}$  prema sljedećem izrazu:

$$n_{SSG1} = \frac{n_m}{i} [1/\text{min}] , \quad (4.9)$$

odnosno:

$$n_{SSG1} = \frac{6 \cdot n_m}{i} [^\circ/s] . \quad (4.10)$$

Konačno, promjena kuta zakreta postolja manipulatora  $\Delta\alpha$  u odnosu na početni kut postolja manipulatora  $\alpha_0$  se određuje integracijom brzine vrtnje prema sljedećem izrazu:

$$\Delta\alpha = \int_0^T n_{SSG1} dt \quad [^\circ], \quad (4.11)$$

gdje  $T$  [s] predstavlja vrijeme do postizanja stacionirane vrijednosti kuta zakreta ruke.

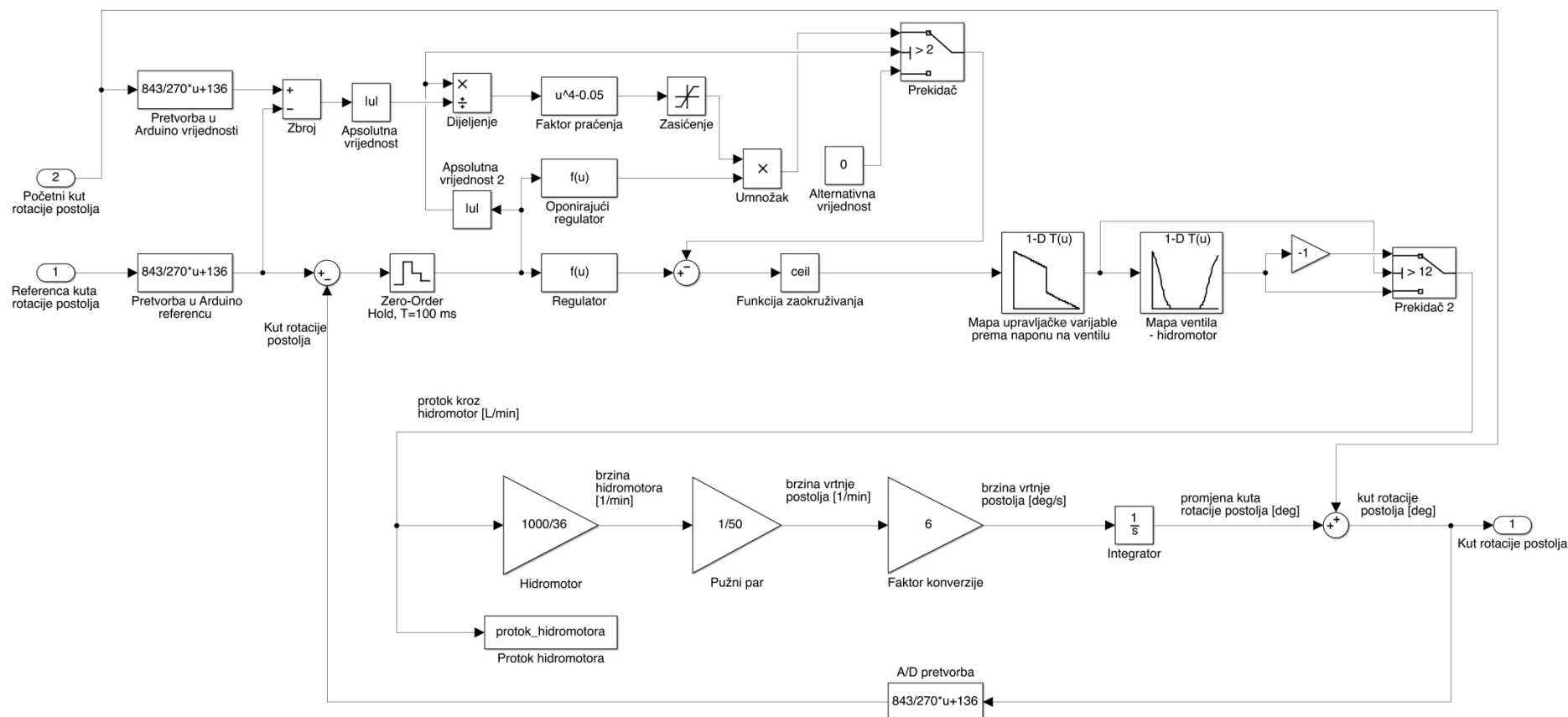
Sukladno tome se konačna vrijednost kuta zakreta postolja manipulatora  $\alpha_1$ , može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad [^\circ], \quad (4.12)$$

odnosno :

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \int_0^T n_{SSG1} dt \quad [^\circ]. \quad (4.13)$$

Opisani postupak određivanja kuta zakreta prvog stupnja slobode gibanja manipulatora je predstavljen u simulacijskom modelu prikazanom na slici 38. Pri tome su ulazne varijable modela referenca kuta rotacije postolja i početni kut rotacije postolja, dok je izlazna varijabla trenutni kut rotacije postolja. Blok oznake *Prekidač 2* (slika 38.) služi za određivanje smjera toka fluida s obzirom na zadanu upravljačku varijablu, pri čemu se za vrijednosti napona ispod središnjih 12 V, tok fluida reverzira u odnosu na tok u slučaju vrijednosti napona iznad 12 V. S obzirom da je eksperimentalno pokazano da maksimalni protoci fluida kroz ventilske segmente ne odgovaraju nazivnim vrijednostima protoka, oni nisu ograničeni na te vrijednosti već se za potrebu ograničenja koristi sam oblik regulatora koji upravljačku varijablu ograničeno daje u cjelobrojnom intervalu od -100 do 100.



Slika 38. Simulacijski model prvog stupnja slobode gibanja manipulatora, rotacije postolja

Napomena:  $f(u) = 100 \cdot \tanh(0,005 \cdot u)$ .

U ovom slučaju je upotrebljen regulator prema izrazu 4.7. pri čemu je parametar  $A$  iznosa 0,005, parametar  $B$  iznosa 4, dok je parametar  $C$  iznosa 0,05.

Iako je prema izrazu 4.7 djelovanje regulatora opisano s negativnim predznakom, u realnoj implementaciji predznak ovisi o samom izvedenom stanju spoja hidrauličkih crijeva na ventilskom bloku i o izrađenom korisničkom sučelju aplikacije. Iz tog razloga se u slučajevima sva tri stupnja slobode gibanja regulator upotrebljava s pozitivnim predznakom.

#### 4.2.2. Podsustav drugog stupnja slobode gibanja

Drugi stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja rotaciju dijela ruke s teleskopskim cilindrom oko horizontalne osi definirane osovinom na koju je pričvršćen rotacijski davač (slika 16.). Aktuacija rotacije ruke se vrši djelovanjem dvoradnog hidrauličkog cilindra promjera klipa iznosa  $D_1 = 50$  mm, promjera klipnjače  $D_2 = 25$  mm te maksimalnog hoda iznosa  $l_{1,max} = 208$  mm. Za simulaciju sustava je stoga nužno odrediti ovisnost brzine klipnjače cilindra o iznosu upravljačke varijable. Pri tome se, kao i u prošlom slučaju, upotrebljavaju dvije mape kojima se vrijednost upravljačke varijable drugog stupnja slobode gibanja  $u_2$ , preslikava u ulazni protok ulja u cilindar  $Q_{cl}$  izražen u mjernoj jedinici L/min. Iz navedenog protoka se poznavanjem djelujuće površine klipa  $A_1$  (iz promjera  $D_1$  i  $D_2$ ) može odrediti brzina klipnjače  $v_{cl}$  podiznog cilindra prema sljedećem izrazu:

$$v_{cl} = \frac{1 \cdot 10^6}{60} \cdot \frac{Q_{cl}}{A_1} \text{ [mm/s]}, \quad (4.14)$$

gdje je :

$$A_1 = \begin{cases} \frac{D_1^2 \cdot \pi}{4} \text{ [mm}^2\text{]}, v_{cl} > 0 \\ \frac{(D_1^2 - D_2^2) \cdot \pi}{4} \text{ [mm}^2\text{]}, v_{cl} < 0 \end{cases}, \quad (4.15)$$

dok je konstanta u izrazu 4.14 faktor konverzije mjernih jedinica u jedinicu mm/s.

Konačno, promjena duljine cilindra ruke manipulatora  $\Delta l_1$ , u odnosu na početnu duljinu cilindra  $\Delta l_{1,0}$  se određuje integracijom brzine klipnjače cilindra prema sljedećem izrazu:

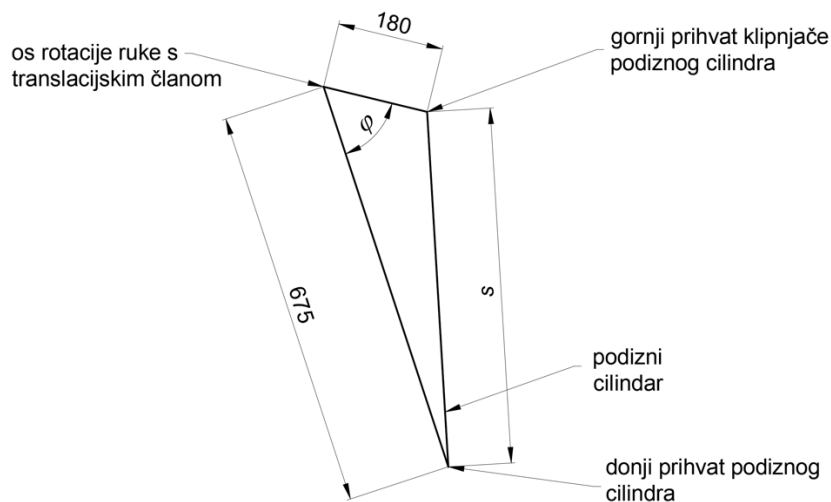
$$\Delta l_1 = \int_0^T v_{cl} dt \text{ [mm]}, \quad (4.16)$$

gdje  $T$  [s] predstavlja vrijeme do postizanja stacionirane vrijednosti kuta zakreta ruke.

Sukladno tome se konačna vrijednost duljine dvoradnog cilindra  $l_1$ , koji aktira drugi stupanj slobode gibanja, može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$l_1 = l_{1,0} + \int_0^T v_{c1} dt \quad [\text{mm}], \quad (4.17)$$

Slika 39. prikazuje skicu izmjerenih geometrijskih karakteristika međusobnih položaja oslonaca cilindra i osovine ruke manipulatora. Duljina cilindra u potpuno uvučenom položaju iznosi 515 mm, dok u potpuno izvučenom položaju iznosi 723 mm.



**Slika 39. Skica izmjerenih geometrijskih odnosa podiznog cilindra i osi rotacije ruke s translacijskim članom**

Iz navedene skice je, primjenom kosinusovog poučka, moguće izraziti ovisnost kuta zakreta ruke o produljenju hidrauličkog cilindra prema sljedećem izrazu:

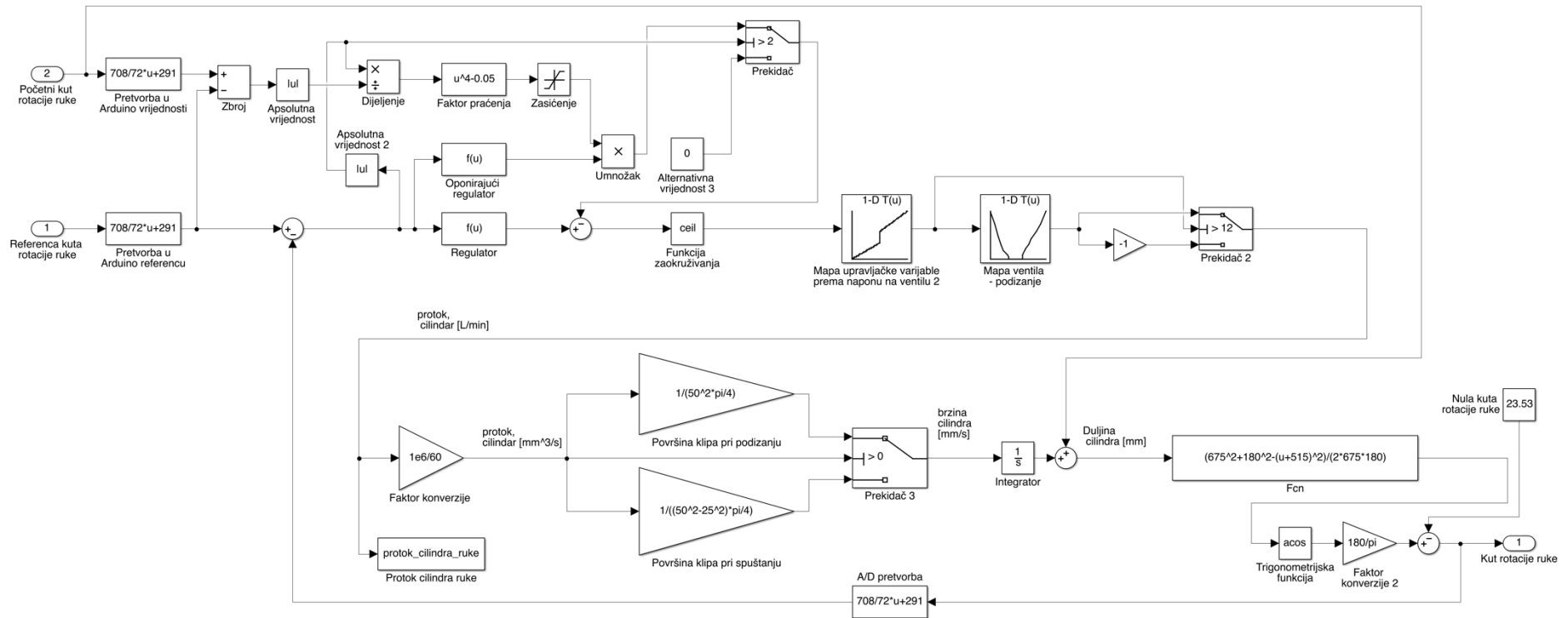
$$\varphi(l_1) = \arccos\left(a^2 + b^2 - \frac{l_1^2}{2ab}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ], \quad (4.18)$$

odnosno uz uvrštene vrijednosti duljina:

$$\varphi(l_1) = \arccos\left(675^2 + 180^2 - \frac{l_1^2}{2 \cdot 675 \cdot 180}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ]. \quad (4.19)$$

Opisani postupak određivanja duljine cilindra drugog stupnja slobode gibanja manipulatora je predstavljen u simulacijskom modelu prikazanom na slici 40. Pri tome su ulazne varijable modela referenca kuta zakreta ruke manipulatora i početni kut zakreta ruke, dok je izlazna varijabla trenutni kut zakreta ruke manipulatora.





Slika 40. Simulacijski model aktuatora drugog stupnja slobode gibanja manipulatora, dvoradnog cilindra za rotaciju ruke

Napomena:  $f(u) = 100 \cdot \tanh(0,005 \cdot u)$ .

U ovom slučaju je upotrebljen regulator prema izrazu 4.7. pri čemu je parametar  $A$  iznosa 0,005, parametar  $B$  iznosa 4, dok je parametar  $C$  iznosa 0,05, kao i u slučaju regulatora kuta zakreta postolja.

### 4.2.3. Podsustav trećeg stupnja slobode gibanja

Treći stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja translaciju ruke manipulatora, na čijem kraju se nalazi hidraulički aktuirana prihvatnica. Aktuacija translacije ruke se vrši djelovanjem dvoradnog teleskopskog hidrauličkog cilindra s dva stupnja. Promjer klipa prvog stupnja je iznosa  $D_{11} = 63$  mm, a promjer klipnjače  $D_{12} = 55$  mm, dok je promjer klipa drugog stupnja iznosa  $D_{21} = 45$  mm, a promjer klipnjače  $D_{22} = 35$  mm. Maksimalni hod cilindra iznosi  $l_{2,max} = 1000$  mm, pri čemu maksimalni hod prvog stupnja iznosi 500 mm.

Za simulaciju sustava je nužno odrediti ovisnost brzine cilindra o iznosu upravljačke varijable. Pri tome se, kao i u prošlom slučaju, upotrebljavaju dvije mape kojima se vrijednost upravljačke varijable trećeg stupnja slobode gibanja  $u_3$ , preslikava u ulazni protok ulja u teleskopski cilindar  $Q_{c2}$  izražen u mjernoj jedinici L/min. Iz navedenog protoka se poznavanjem djelujuće površine klipa  $A_{21}$  prvog stupnja (iz promjera  $D_{11}$  i  $D_{12}$ ) te djelujuće površine klipa  $A_{22}$  drugog stupnja (iz promjera  $D_{21}$  i  $D_{22}$ ), može odrediti brzina  $v_{c2}$  teleskopskog cilindra prema sljedećem izrazu:

$$v_{c2} = \begin{cases} \frac{1 \cdot 10^6}{60} \frac{Q_{c2}}{A_{21}}, & l_2 \leq 500 \text{ mm} \\ \frac{1 \cdot 10^6}{60} \frac{Q_{c2}}{A_{22}}, & l_2 > 500 \text{ mm} \end{cases} \quad [\text{mm/s}], \quad (4.20)$$

gdje su :

$$A_{21} = \begin{cases} \frac{D_{11}^2 \cdot \pi}{4}, & v_{c2} > 0 \\ \frac{(D_{11}^2 - D_{12}^2) \cdot \pi}{4}, & v_{c2} < 0 \end{cases} \quad [\text{mm}^2], \quad (4.21)$$

$$A_{22} = \begin{cases} \frac{D_{21}^2 \cdot \pi}{4}, & v_{c2} > 0 \\ \frac{(D_{21}^2 - D_{22}^2) \cdot \pi}{4}, & v_{c2} < 0 \end{cases} \quad [\text{mm}^2]. \quad (4.22)$$

Konačno, promjena duljine teleskopskog cilindra manipulatora  $\Delta l_2$  u odnosu na početnu duljinu cilindra  $l_{2,0}$  se određuje integracijom brzine posmaka cilindra prema sljedećem izrazu:

$$\Delta l_2 = \int_0^T v_{c2} dt \quad [\text{mm}], \quad (4.23)$$

gdje  $T$  [s] predstavlja vrijeme do postizanja stacionirane vrijednosti duljine teleskopskog cilindra.

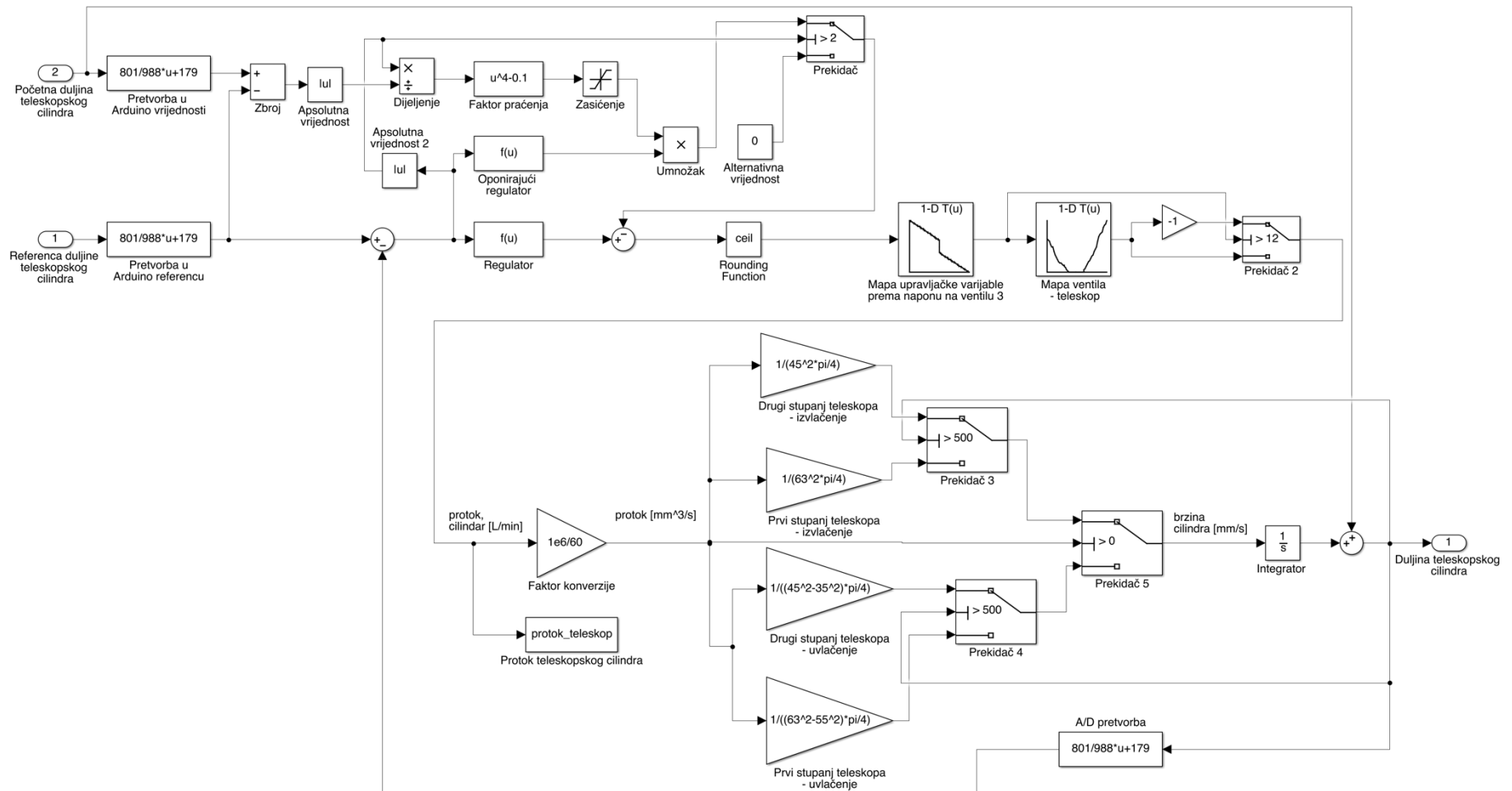
Sukladno tome se konačna vrijednost duljine teleskopskog cilindra  $l_2$  koji aktira treći stupanj slobode gibanja, može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$l_2 = l_{2,0} + \Delta l_2 \quad [\text{mm}], \quad (4.24)$$

odnosno :

$$l_2 = l_{2,0} + \int_0^T v_{c2} dt \quad [\text{mm}]. \quad (4.25)$$

Opisani postupak određivanja produljenja cilindra trećeg stupnja slobode gibanja manipulatora je predstavljen u simulacijskom modelu prikazanom na slici 41. Pri tome su ulazne varijable modela referenca duljine teleskopskog cilindra i početna duljina teleskopskog cilindra, dok je izlazna varijabla trenutna duljina teleskopskog cilindra.



Slika 41. Simulacijski model aktuatora trećeg stupnja slobode gibanja manipulatora, dvoradnog dvostupanjskog teleskopskog cilindra

Napomena:  $f(u) = 100 \cdot \tanh(0,01 \cdot u)$ .

U ovom slučaju je upotrebljen regulator prema izrazu 4.7. pri čemu je parametar  $A$  iznosa 0,01, parametar  $B$  iznosa 4, dok je parametar  $C$  iznosa 0,1. U odnosu na prva dva stupnja slobode gibanja, učinjena je promjena parametara  $A$  i  $C$  uzimajući u obzir veličinu cilindra i činjenicu da sam način translacijskog djelovanja cilindra uzrokuje manje brzine prihvatnice manipulatora u odnosu na rotacijske stupnjeve slobode gibanja. Naime, kod rotacijskih članova, os rotacije je na velikom kraku od same prihvatnice što dovodi do velikih obodnih brzina i pri malim brzinama aktuatora. S tim na umu su parametri translacijskog člana podešeni na način da smanje vrijeme trajanja gibanja u odnosu na slučaj ako bi bili primijenjeni parametri regulatora prva dva stupnja slobode gibanja.

#### **4.2.4. Podsustav hidraulički aktuirane prihvatnice**

Prihvatnica koja se nalazi na kraju mehaničke strukture manipulatora je aktuirana putem dvoradnog hidrauličkog cilindra, pri čemu je promjer klipa cilindra prihvatnice iznosa  $D_3 = 25 \text{ mm}$ , dok je promjer klipnjače iznosa  $D_4 = 10 \text{ mm}$ .

S obzirom da cilindar prihvatnice nema ugrađenu nikakvu mogućnost mjerenja duljine samog cilindra, a time ni određivanja otvorenosti ili zatvorenosti prihvatnice, navedeni podsustav nije moguće regulirati, već samo upravljati. Za proceduru otvaranja i zatvaranja prihvatnice u automatskom režimu rada je nužno simulacijski odrediti te eksperimentalno potvrditi veličinu upravljačke varijable te potrebno vrijeme njenog djelovanja kako bi se osiguralo potpuno otvaranje ili zatvaranje prihvatnice.

Za određivanje produljenja cilindra prihvatnice je potrebno uspostaviti vezu ovisnosti protoka ulja cilindra o upravljačkoj varijabli prihvatnice. Pri tome se, kao što je to učinjeno u slučajevima uspostavljanja ovisnosti za tri stupnja slobode gibanja manipulatora, upotrebljavaju dvije mape kojima se vrijednost upravljačke varijable  $u_4$ , preslikava u ulazni protok ulja u cilindar prihvatnice  $Q_{e3}$  izražen u mjernoj jedinici L/min. Pri tome se u slučaju prihvatnice upotrebljava teoretska mapa za ventilski segment maksimalnog protoka iznosa 5 L [2]. Iz navedenog protoka se poznavanjem djelujuće površine klipa  $A_3$  (iz promjera  $D_3$  i  $D_4$ ) može odrediti brzina klipnjače  $v_{e3}$  cilindra prihvatnice prema sljedećem izrazu:

$$v_{c3} = \frac{1 \cdot 10^6}{60} \frac{Q_{e3}}{A_3} \text{ [mm/s]}, \quad (4.26)$$

gdje je :

$$A_3 = \begin{cases} \frac{D_3^2 \cdot \pi}{4}, & \text{za otvaranje} \\ \frac{(D_3^2 - D_4^2) \cdot \pi}{4}, & \text{za zatvaranje} \end{cases} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (4.27)$$

dok je konstanta u izrazu 4.26 faktor konverzije mjernih jedinica u jedinicu mm/s .

Konačno, promjena duljine cilindra prihvatnice manipulatora  $\Delta l_3$  u odnosu na početnu duljinu cilindra  $l_{3,0}$  se određuje integracijom brzine klipnjače cilindra prema sljedećem izrazu:

$$\Delta l_3 = \int_0^T v_{c3} dt \text{ [mm]}, \quad (4.28)$$

gdje  $T$  [s] predstavlja vrijeme do postizanja krajnje pozicije klipnjače cilindra prihvatnice.

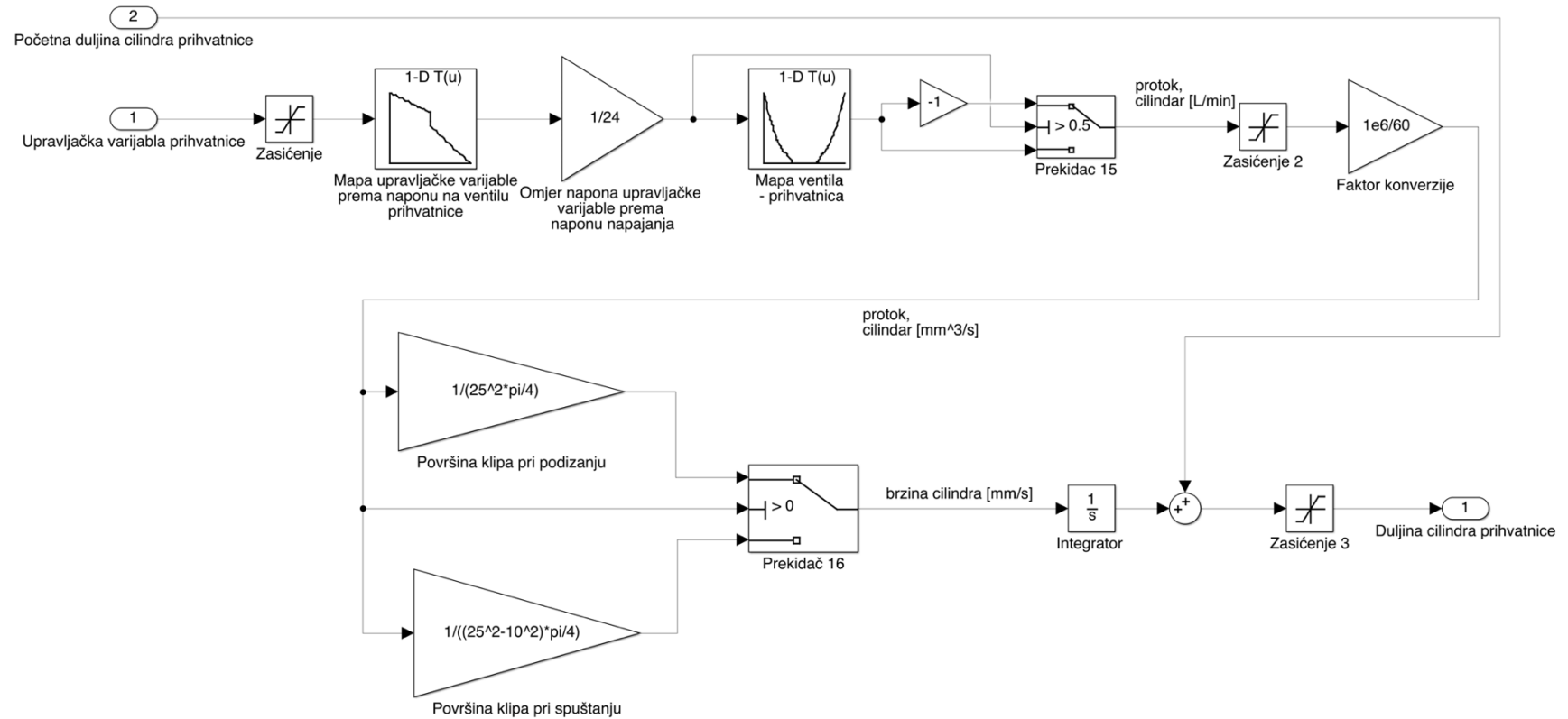
Sukladno tome se konačna vrijednost duljine dvoradnog cilindra prihvatnice  $l_3$  , može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$l_3 = l_{3,0} + \Delta l_3 \text{ [mm]}, \quad (4.29)$$

odnosno :

$$l_3 = l_{3,0} + \int_0^T v_{c3} dt \text{ [mm]}. \quad (4.30)$$

Opisani postupak određivanja produljenja cilindra prihvatnice manipulatora je u simulacijskom modelu prikazanom na slici 42. Pri tome su ulazne varijable modela upravljačka varijabla prihvatnice i početna duljina cilindra prihvatnice, dok je izlazna varijabla trenutna duljina cilindra.



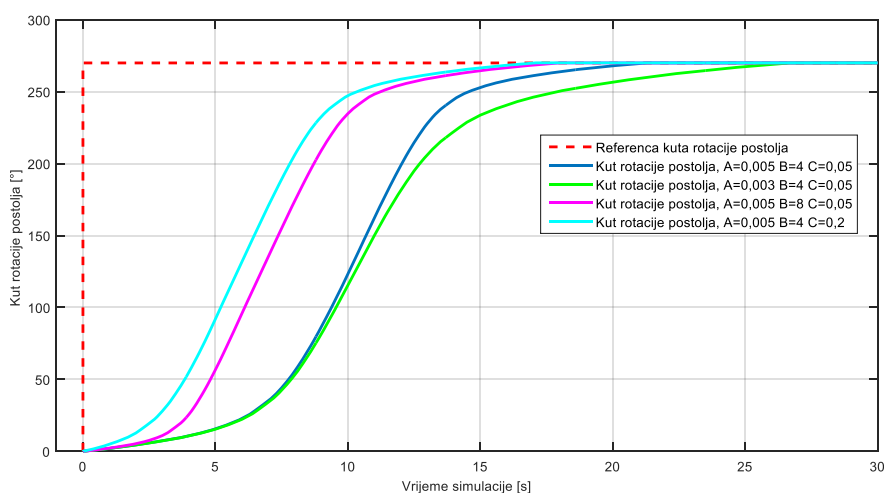
Slika 42. Simulacijski model upravljanja cilindrom prihvatnice

### 4.3. Rezultati simulacija

U ovom potpoglavlju će biti dani rezultati simulacija izvedenih na prethodno predstavljenim simulacijskim modelima. Pri tome će se rezultati prezentirati kroz odzive sustava za režime velikih i malih skokova reference sustava te dijagrame protoka ulja aktuatora pojedinih stupnjeva slobode gibanja. Bitno je napomenuti da se u svim ispitnim slučajevima upotrebljava isti regulator opisan uz svaki stupanj slobode gibanja zasebno. Pri tome će se pokazati i kako promjene parametara  $A$ ,  $B$  i  $C$  regulatora utječu na odziv sustava.

#### 4.3.1. Prvi stupanj slobode gibanja

Prvi stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja rotaciju čitave ruke manipulatora oko vertikalne osi definirane rotacijskom osi pužnog kola. Radno područje prvog stupnja slobode gibanja je opisano kutom od  $270^\circ$ , pri čemu će u režimu malih signala odziv sustava biti ispitivan na skok reference od  $5^\circ$ , dok će u režimu promjene reference velikog iznosa sustav biti ispitan na najveći mogući skok reference iznosa  $270^\circ$ . Odziv rotacije postolja na skok reference od  $270^\circ$  je prikazan na slici 43.



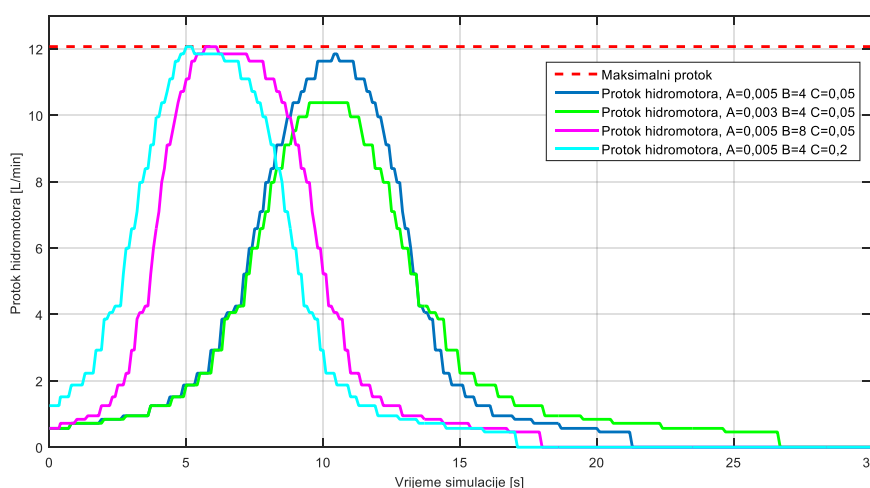
**Slika 43. Odziv rotacije postolja na referencu kuta postolja iznosa  $270^\circ$  uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Iz odziva prikazanog na slici 43. možemo vidjeti kako odziv sustava, pri upotrebi regulatora s izvornim parametrima ( $A = 0,005$   $B = 4$   $C = 0,05$ ), pokazuje postepeno ubrzanje sustava u skladu s objašnjenim utjecajem parametara  $B$  i  $C$  regulatora, čime se umanjuje pojava trzaja pri pokretanju sustava. S druge strane možemo vidjeti da odziv sustava asimptotski dostiže zadanu referentnu vrijednost iznosa  $270^\circ$ .



U slučaju potrebe ubrzanja odziva sustava, navedeno je moguće učiniti povećanjem parametra  $B$  (krivulja odziva za promijenjeni parametar iznosa  $B=8$  na slici 43.) ili povećanjem parametra  $C$  koji povećava nagib krivulje odziva sustava u početnom dijelu gibanja (krivulja odziva za promijenjeni parametar  $C=0,2$  na slici 43.) Na navedenoj slici je također vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  na iznos  $A=0,003$  u odnosu na izvorni parametar iznosa  $A=0,005$  uzrokuje usporenje sustava, produljujući time vrijeme potrebno da sustav dostigne referentni položaj. Pri tome je također vidljivo kako navedena promjena parametra  $A$  ne uzrokuje promjene u početnom dijelu odziva sustava koji je određen vrijednostima parametara  $B$  i  $C$  koji su ostali nepromijenjeni.

Na sljedećoj slici (slika 44.) možemo vidjeti usporedbu protoka ulja hidromotora za odzive sustava rotacije postolja manipulatora prikazane na slici 43.

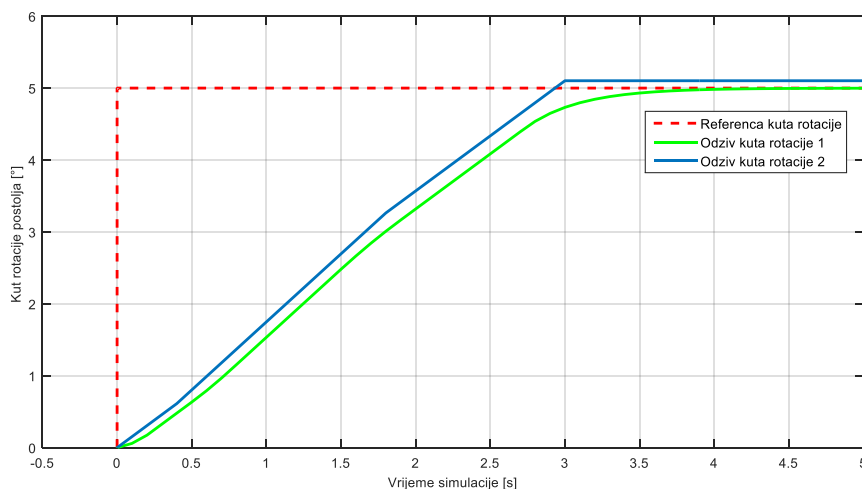


**Slika 44. Usporedba protoka hidromotora za skok reference iznosa  $270^\circ$  uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Pri tome možemo vidjeti kako dijagram protoka jasno pokazuje da je ostvareno kontrolirano ubrzanje i usporenje sustava prema zahtjevima postavljenima na sam regulator. Time je, sukladno slici 43. vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  (krivulja odziva s parametrom  $A=0,003$ ) utječe na samo smanjenje protoka u središnjem i krajnjem dijelu gibanja, dok je protok u početnom dijelu ostao nepromijenjen s obzirom na nepromijenjene iznose parametara  $B$  i  $C$ . Nadalje, moguće je vidjeti kako povećanje parametra  $B$  (krivulja odziva protoka s parametrom  $B$  iznosa 8) uzrokuje veći nagib krivulje protoka u odnosu na izvorni iznos parametra što sugerira veću akceleraciju sustava. Navedeno je jasno vidljivo i u značajnom smanjenju vremena potrebnog za dostizanje referentnog položaja. Slično je moguće postići i povećanjem parametra  $C$ , što uzrokuje veći iznos protoka ulja u početnom trenutku, no uz

manji nagib kasnijeg odziva prilikom ubrzanja sustava u odnosu na odziv sustava povezan uz povećanje parametra  $B$ . Pri tome je krivulja odziva u području povećanja protoka praktički paralelna s krivuljom odziva u slučaju izvornih parametara i u slučaju gdje je samo parametar  $A$  promijenjen.

Odziv kuta rotacije postolja na skok reference od  $5^\circ$ , u režimu malih signala, je prikazan na slici 45. pri čemu odziv s oznakom 1 prikazuje teoretski regulator, dok odziv oznake 2 prikazuje odziv sustava s realnim regulatorom.

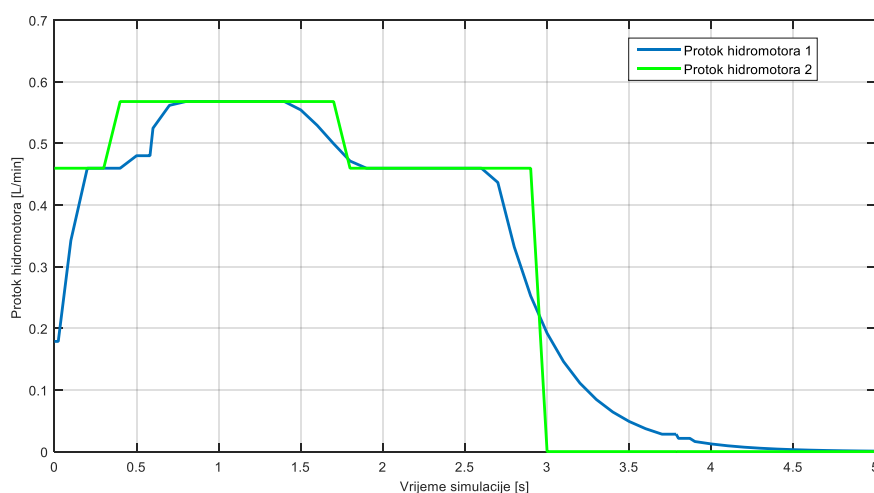


**Slika 45. Odziv kuta rotacije postolja na referencu kuta postolja iznosa  $5^\circ$  teoretskog regulatora (odziv oznake 1) i realnog regulatora (odziv oznake 2)**

Pri tome je, analizom slike 45., u slučaju malih režima signala moguće uočiti razliku između teoretskog regulatora i regulatora u sprezi s realnim komponentama manipulatora. Naime, teoretski regulator koji na raspolaganju ima neograničeno finu razdiobu mogućih protoka ventila, ostvaruje asimptotsko dostizanje zadane reference. S druge strane, primjenom realnog mikrokontrolera i uskog raspona mogućeg upravljačkog signala ventilskog bloka, broj ostvarivih različitih protoka je ograničen samim načinom upravljanja. Nadalje, kako bi se svi zahtjevi za gibanjem mogli ostvariti, ma kako mali oni bili, u realnoj implementaciji u EHRM PRO aplikaciji je uvedena funkcija zaokruživanja upravljačke varijable koja uvijek zaokružuje izračunatu vrijednost upravljačke varijable na gornji cjelobrojni iznos (funkcija *ceil* prikazana na simulacijskom modelu na slici 38.). S obzirom na to, sustav u realnoj primjeni nema mogućnost bezstupnjevitog upravljanja kao u slučaju teoretskog regulatora, čime dolazi do laganog odstupanja od zadanog referentnog položaja s gornje strane. Navedeno ne predstavlja problem za primjenu navedenog regulatora s obzirom da je u krajnjim trenutcima gibanja, u blizini referentnog položaja, i brzina aktuatora mala čime je omogućeno programsko djelovanje

aplikacije prilikom dostizanja referentnog položaja na način da ona zaustavi gibanje manipulatora, eliminirajući time navedeni prebačaj. Prednost realnog regulatora u odnosu na teoretski je brže dostizanje referentne pozicije, ali s većim trzajem pri kretanju i zaustavljanju manipulatora koje je određeno minimalno postizivim protokom fluida.

Dijagram protoka hidromotora za odziv sustava na skok reference od  $5^\circ$  je prikazan na slici 46.



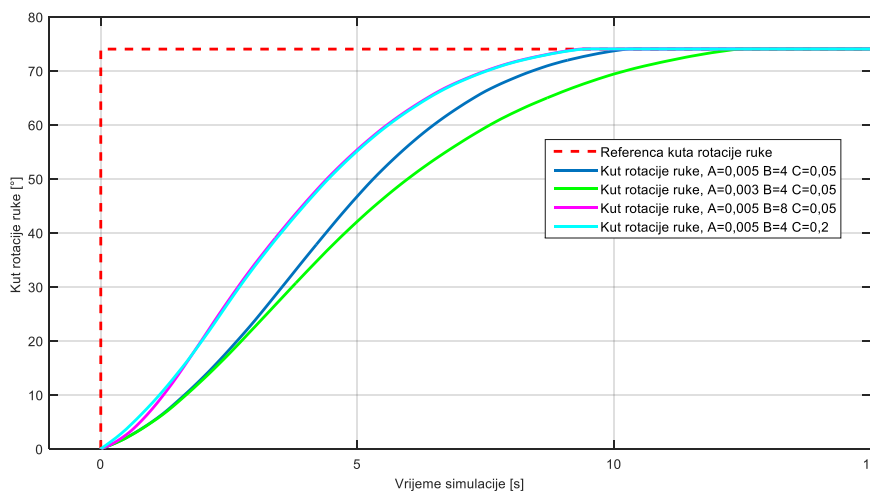
**Slika 46. Usporedba protoka hidromotora za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa  $5^\circ$**

Pri tome se na slici 46. mogu vrlo jasno uočiti razlike u teoretskom regulatoru koji raspolaže s neograničenim stupnjevanjem upravljačke varijable i praktičnog regulatora koji ostvaruje stepeničasti odziv protoka fluida s obzirom na ograničene realno ostvarive protoke prilikom upravljanja proporcionalnim ventilskim segmentom realnim mikrokontrolerom.

#### 4.3.2. Drugi stupanj slobode gibanja

Drugi stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja rotaciju dijela ruke s teleskopskim cilindrom oko horizontalne osi definirane osovinom na koju je pričvršćen rotacijski davač prikazan na slici 16. Radno područje drugog stupnja slobode gibanja je opisano kutom od  $74^\circ$ , odnosno maksimalnim hodom dvoradnog cilindra iznosa 208 mm. U režimu malih signala, odziv sustava će biti ispitivan na skok reference od  $5^\circ$ , dok će u režimu velikog signala sustav biti ispitan na najveći mogući skok reference iznosa  $74^\circ$ .

Odziv duljine cilindra s obzirom na skok reference od  $74^\circ$  je prikazan na slici 47.

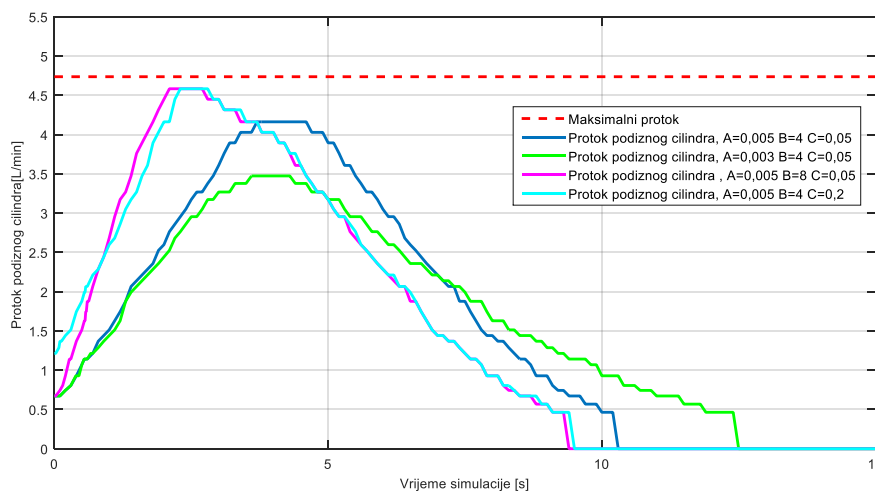


**Slika 47. Odstav kuta rotacije ruke na referencu kuta rotacije iznosa 74 ° uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Iz odziva prikazanog na slici 47. možemo vidjeti kako odziv sustava, pri upotrebi regulatora s izvornim parametrima ( $A = 0,005$   $B = 4$   $C = 0,05$ ), pokazuje postepeno ubrzanje sustava kao i u slučaju prvog stupnja slobode gibanja, čime je umanjena pojava trzaja pri pokretanju sustava. S druge strane možemo vidjeti da odziv sustava i u ovom slučaju asimptotski dostiže zadanu referentnu vrijednost.

U slučaju potrebe ubrzanja odziva sustava, navedeno je moguće učiniti povećanjem parametra  $B$  (krivulja odziva za promijenjeni parametar iznosa  $B = 8$  na slici 47.) ili povećanjem parametra  $C$  koji povećava nagib krivulje odziva sustava u početnom dijelu gibanja (krivulja odziva za promijenjeni parametar  $C = 0,2$  na slici 47.) Na navedenoj slici je također vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  na iznos  $A = 0,003$  u odnosu na izvorni parametar iznosa  $A = 0,005$  uzrokuje ponovno usporenje sustava, produljujući time vrijeme potrebno da sustav dostigne referentni položaj. Pri tome je također vidljivo kako navedena promjena parametra  $A$  i u ovom slučaju ne uzrokuje promjene u samom početnom dijelu odziva sustava koji je određen vrijednostima parametara  $B$  i  $C$  koji su ostali nepromijenjeni.

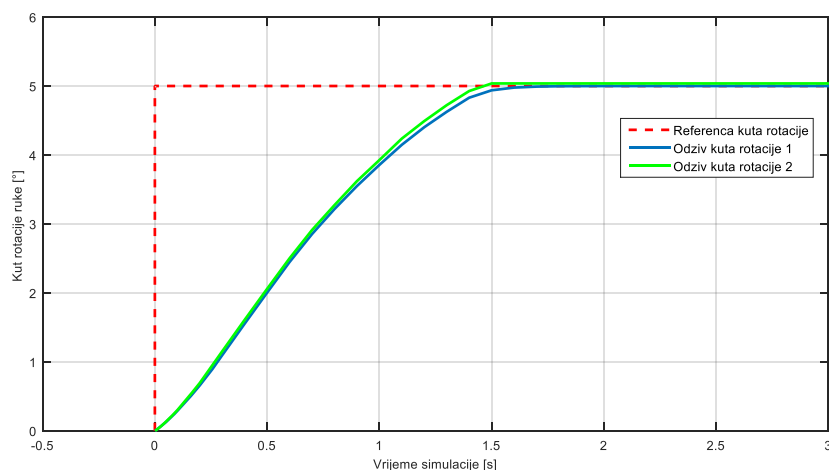
Na sljedećoj slici (slika 48.) možemo vidjeti usporedbu protoka ulja podiznog cilindra za odzive sustava rotacije ruke manipulatora prikazane na slici 47.



**Slika 48. Usporedba protoka podiznog cilindra za skok reference iznosa  $74^\circ$  uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Pri tome možemo vidjeti kako dijagram protoka jasno pokazuje da je ostvareno kontrolirano ubrzanje i usporenje sustava prema zahtjevima postavljenima na sam regulator, kao i u slučaju rotacije postolja. Time je, sukladno slici 47., vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  (krivulja odziva s parametrom  $A = 0,003$  na slici 48.) utječe na samo smanjenje protoka u središnjem i krajnjem dijelu gibanja, dok je iznos protoka u početnom dijelu ostao nepromijenjen s obzirom na nepromijenjene iznose parametara  $B$  i  $C$ . Nadalje, moguće je vidjeti kako povećanje parametra  $B$  (krivulja odziva protoka s parametrom  $B$  iznosa 8) uzrokuje veći nagib krivulje protoka u odnosu na izvorni iznos parametra što sugerira veću akceleraciju sustava. Navedeno je jasno vidljivo i u smanjenju vremena potrebnog za dostizanje referentnog položaja u odnosu na krivulju određenu izvornim parametrima regulatora ( $A = 0,005$   $B = 8$   $C = 0,05$ ). Slično je moguće postići i povećanjem parametra  $C$ , što uzrokuje veći iznos protoka ulja u početnom trenutku, no uz manji nagib kasnijeg odziva prilikom ubrzanja sustava u odnosu na odziv sustava povezan uz povećanje parametra  $B$ . Pri tome je krivulja odziva u području povećanja protoka praktički paralelna s krivuljom odziva u slučaju izvornih parametara i u slučaju gdje je samo parametar  $A$  promijenjen.

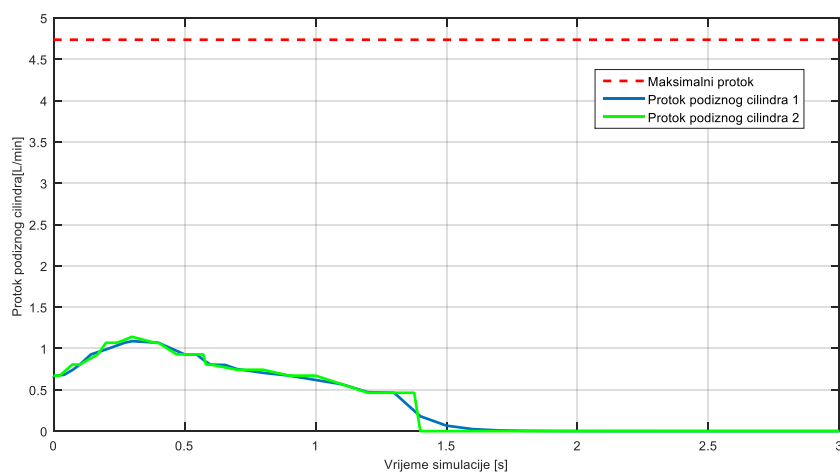
Odziv kuta rotacije ruke na skok reference od 5 mm, u režimu malih signala, je prikazan na slici 49., pri čemu odziv s oznakom 1 prikazuje teoretski regulator, dok odziv oznake 2 prikazuje odziv sustava s realnim regulatorom.



**Slika 49. Odziv kuta rotacije ruke na referencu kuta iznosa 5° teoretskog regulatora (odziv oznake 1) i realnog regulatora (odziv oznake 2)**

Za razliku od prvog stupnja slobode gibanja kod kojeg je odstupanje od teoretskog i realnog regulatora bilo značajno (slika 45.), pri rotaciji ruke se navedena pojava ne ističe značajnije. Razlog tomu se krije u podešenosti sustava za prilagodbu protoka prema trenutnim zahtjevima izvršnih elemenata, prema već danom objašnjenju u potpoglavlju 2.1.1. Time je omogućen veći broj mogućih iznosa protoka fluida u odnosu na slučaj rotacije postolja, čime se razlika u odzivu realnog i teoretskog regulatora značajno smanjila. Nadalje, vidljivo je kako realni regulator dostiže referentni položaj bez prebačaja koji se mogao uočiti u slučaju rotacije postolja, a razlog tomu je upravo navedena mogućnost većeg stupnjevanja protoka fluida.

Dijagram protoka podiznog cilindra za odziv sustava na skok reference od 5 mm je prikazan na slici 50.



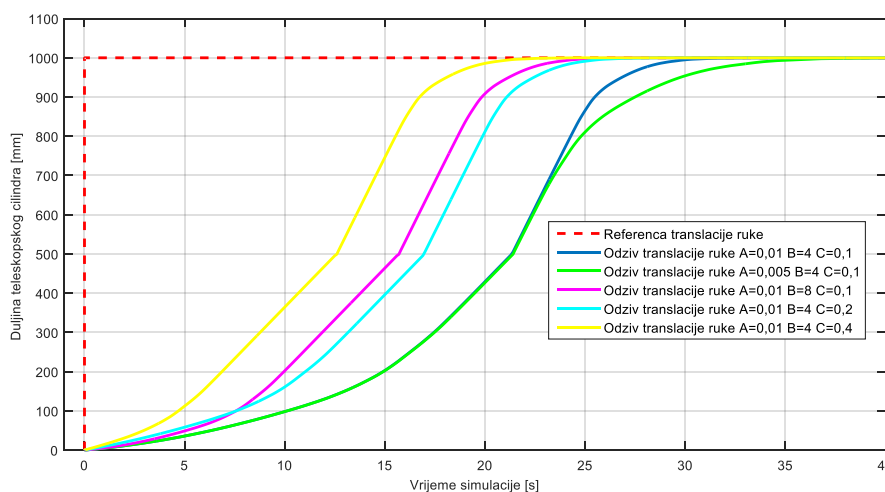
**Slika 50. Usporedba protoka podiznog cilindra za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa 5°**

Prethodno objašnjena mogućnost većeg raspona mogućih protoka fluida se jasno vidi i na odzivima brzina na slici 50., pri čemu odziv s oznakom 1 odgovara odzivu sustava s teoretskim regulatorom, dok odziv oznake 2 odgovara odzivu sustava s realnim regulatorom. Pri tome je vidljivo da odziv sustava realnog regulatora u većoj mjeri prati odziv sustava teoretskog regulatora, nego što je to bio slučaj kod prvog stupnja slobode gibanja, što je u skladu s prethodno danim objašnjenjima.

#### 4.3.3. Treći stupanj slobode gibanja

Treći stupanj slobode gibanja manipulatora predstavlja translaciju ruke manipulatora, na čijem kraju se nalazi hidraulički aktuirana prihvatnica. Radno područje trećeg stupnja slobode gibanja je određeno maksimalnim hodom teleskopskog cilindra iznosa 1000 mm. U režimu malih signala odziv sustava će biti ispitivan na skok reference od 5 mm, dok će u režimu velikog signala sustav biti ispitivan na najveći mogući skok reference iznosa 1000 mm.

Odziv duljine cilindra s obzirom na skok reference od 1000 mm je prikazan na slici 51.

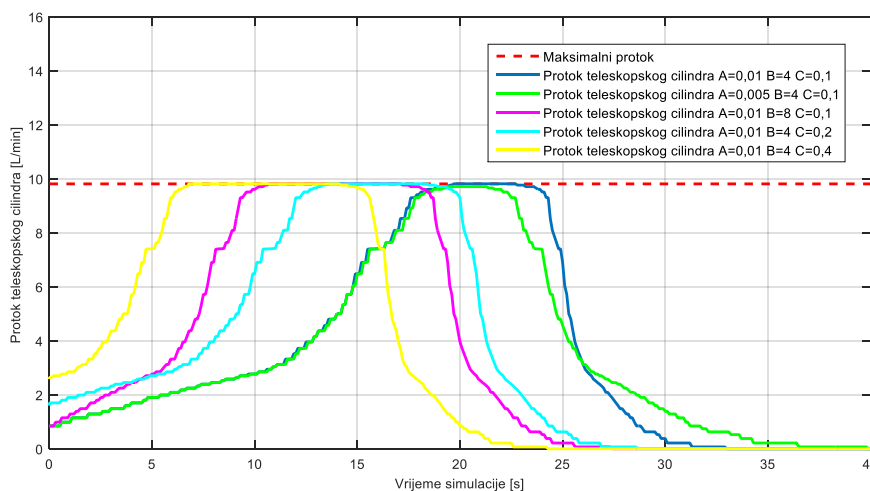


**Slika 51. Odziv duljine teleskopskog cilindra na referencu duljine teleskopskog cilindra iznosa 988 mm uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Iz odziva prikazanog na slici 51. možemo vidjeti kako odziv sustava, pri upotrebi regulatora s izvornim parametrima ( $A = 0,01$   $B = 4$   $C = 0,1$ ), pokazuje postepeno ubrzanje sustava kao i u slučaju prva dva stupnja slobode gibanja, čime je umanjena pojava trzaja pri pokretanju sustava. S druge strane možemo vidjeti da odziv sustava i u ovom slučaju asimptotski dostiže zadanu referentnu vrijednost.

U slučaju potrebe ubrzanja odziva sustava, navedeno je moguće učiniti povećanjem parametra  $B$  (krivulja odziva za promijenjeni parametar iznosa  $B=8$  na slici 51.) ili povećanjem parametra  $C$  koji povećava nagib krivulje odziva sustava u početnom dijelu gibanja (krivulja odziva za promijenjeni parametar  $C=0,2$  i krivulja odziva za promijenjeni parametar iznosa  $C=0,4$  na slici 51.) Na navedenoj slici je također vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  na iznos  $A=0,005$  u odnosu na izvorni parametar iznosa  $A=0,01$  uzrokuje usporenje sustava kao i u slučaju rotacijskih članova, produljujući time vrijeme potrebno da sustav dostigne referentni položaj. Pri tome je također vidljivo kako navedena promjena parametra  $A$  i u ovom slučaju ne uzrokuje promjene u samom početnom dijelu odziva sustava koji je određen vrijednostima parametara  $B$  i  $C$  koji su ostali nepromijenjeni. Naime, promjene u navedena dva odziva su vidljiva tek u krajnjem dijelu gibanja. Nadalje, na krivuljama svih odziva je moguće vidjeti naglu promjenu nagiba krivulja u okruženju dostignute duljine teleskopskog cilindra od 500 mm. Navedeno je uzrokovano samim dimenzijama teleskopskog cilindra, kod kojeg na navedenoj duljini dolazi do pomicanja klipnjače teleskopskog dijela manjeg promjera, što uz konstantan protok uzrokuje povećanje brzine gibanja cilindra.

Na sljedećoj slici (slika 52.) možemo vidjeti usporedbu protoka teleskopskog cilindra za odzive sustava translacijskog stupnja slobode gibanja manipulatora prikazane na slici 51.



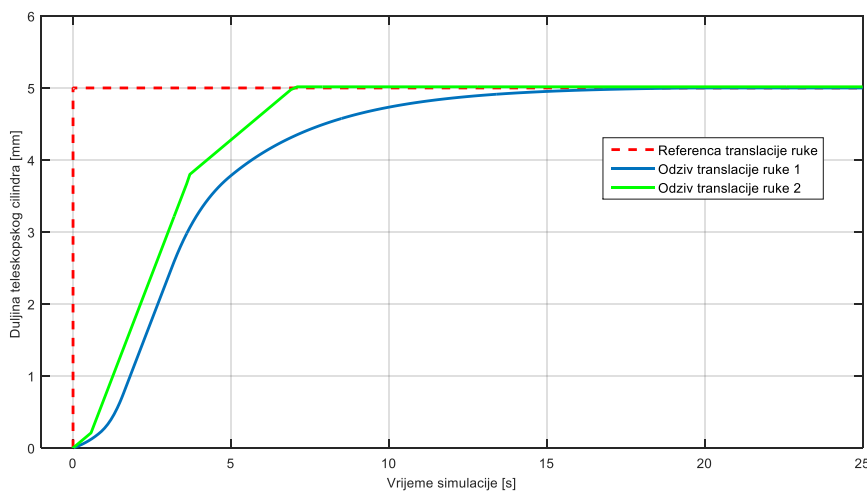
**Slika 52. Usporedba protoka teleskopskog cilindra za skok reference iznosa 1000 mm uz primjenu regulatora promijenjenih parametara**

Pri tome možemo vidjeti kako dijagram protoka jasno pokazuje da je ostvareno kontrolirano ubrzanje i usporenje sustava prema zahtjevima postavljenima na sam regulator, kao i u slučaju rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Time je, sukladno slici 51., vidljivo kako smanjenje parametra  $A$  (krivulja odziva s parametrom  $A=0,005$  na slici 52.) utječe na samo smanjenje



protoka u središnjem i krajnjem dijelu gibanja, dok je protok u početnom dijelu ostao nepromijenjen s obzirom na nepromijenjene iznose parametara  $B$  i  $C$ . Nadalje, moguće je vidjeti kako povećanje parametra  $B$  (krivulja odziva protoka s parametrom  $B$  iznosa 8) uzrokuje veći nagib krivulje protoka u odnosu na izvorni iznos parametra što sugerira veću akceleraciju sustava. Navedeno je jasno vidljivo i u smanjenju vremena potrebnog za dostizanje referentnog položaja u odnosu na krivulju određenu izvornim parametrima regulatora ( $A = 0,005$   $B = 8$   $C = 0,05$ ). Slično je moguće postići i povećanjem parametra  $C$ , što uzrokuje veći iznos protoka ulja u početnom trenutku, no uz manji nagib kasnijeg odziva prilikom ubrzanja sustava u odnosu na odziv sustava povezan uz povećanje parametra  $B$ . Pri tome je krivulja odziva u području povećanja protoka praktički paralelna s krivuljom odziva u slučaju izvornih parametara i u slučaju gdje je samo parametar  $A$  promijenjen kao što je to bilo i u slučaju rotacijskih stupnjeva slobode gibanja.

Odziv duljine teleskopskog cilindra na skok reference od 5 mm, u režimu malih signala, je prikazan na slici 53., pri čemu odziv s oznakom 1 prikazuje odziv sustava s teoretskim regulatorom, dok odziv oznake 2 prikazuje odziv sustava s realnim regulatorom.

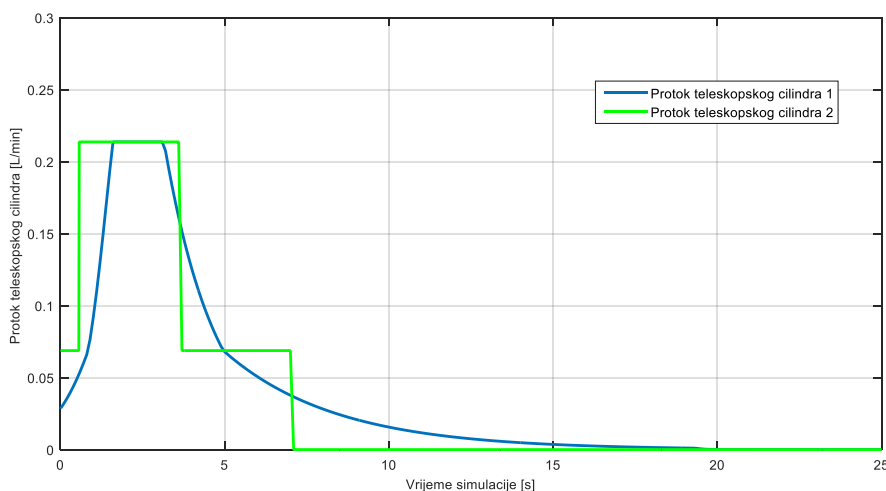


Slika 53. Odziv teleskopskog cilindra na referencu duljine cilindra iznosa 5 mm

Kao i u slučaju prvog stupnja slobode gibanja, odziv sustava s realnim regulatorom pokazuje odstupanje od odziva teoretskog regulatora, ali u manjoj mjeri. Razlog tomu se također krije u podešenosti sustava za prilagodbu protoka prema trenutnim zahtjevima izvršnih elemenata, prema već danom objašnjenju u prethodnom potpoglavlju. Nadalje, također je vidljiv prebačaj sustava u odzivu s realnim regulatorom, kao i u slučaju rotacije postolja, no u manjoj mjeri.

Rješenje navedenog problema je također u programskom praćenju iznosa duljine cilindra te onemogućavanjem daljnjeg djelovanja regulatora prilikom dostizanja referentnog položaja.

Dijagram protoka teleskopskog cilindra za odziv sustava na skok reference od 5 mm je prikazan na slici 54.



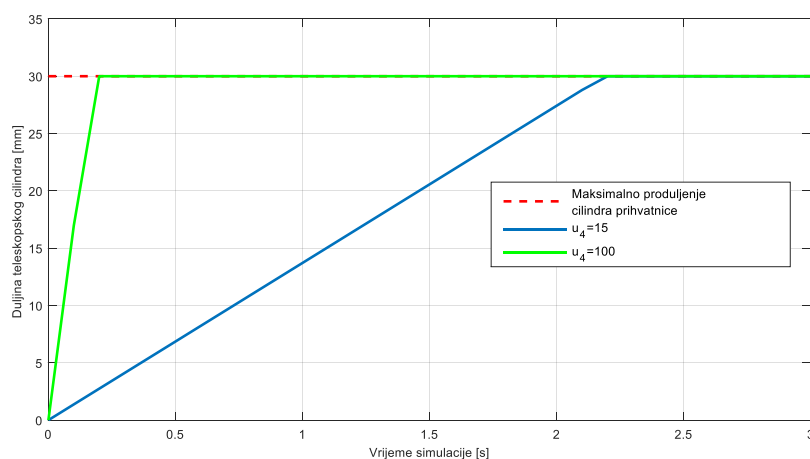
**Slika 54. Usporedba protoka teleskopskog cilindra za teoretski (odziv oznake 1) i realni regulator (odziv oznake 2) i skok reference iznosa 5 mm**

Pri tome se može uočiti da je u odnosu na dijagram protoka drugog stupnja slobode gibanja, ostvariva veća razlika u mogućim iznosima protoka, što dovodi do boljeg uočavanja efekta ubrzanja i usporenja sustava prikazanog krivuljom odziva oznake 2 na slici 53. u odnosu na krivulju odziva oznake 2 u slučaju prvog stupnja slobode gibanja, prikazane na slici 45.

#### 4.3.4. Gibanje prihvatnice

Gibanje prihvatnice je aktuirano dvoradnim hidrauličkim cilindrom maksimalnog hoda iznosa 30 mm koji omogućuje potpuno otvaranje i zatvaranje prihvatnice. S obzirom da nije moguće vršiti regulaciju ovog dijela sustava zbog nemogućnosti mjerenja duljine cilindra, u nastavku će biti pokazani samo simulacijski rezultati upravljanja prihvatnicom za dva različita iznosa upravljačke varijable.

Na slici 55. je prikazan usporedni odziv gibanja hidrauličkog cilindra prihvatnice iz početnog položaja u kojemu je klipnjača cilindra u potpunosti uvučena za upravljačke varijable konstatnog iznosa  $u_4 = 15$  u jednom slučaju i konstatnog iznosa  $u_4 = 100$  u drugom slučaju.



**Slika 55. Odzivi gibanja cilindra prihvatnice za iznose upravljačke varijable  $u_4=15$  i  $u_4=100$**

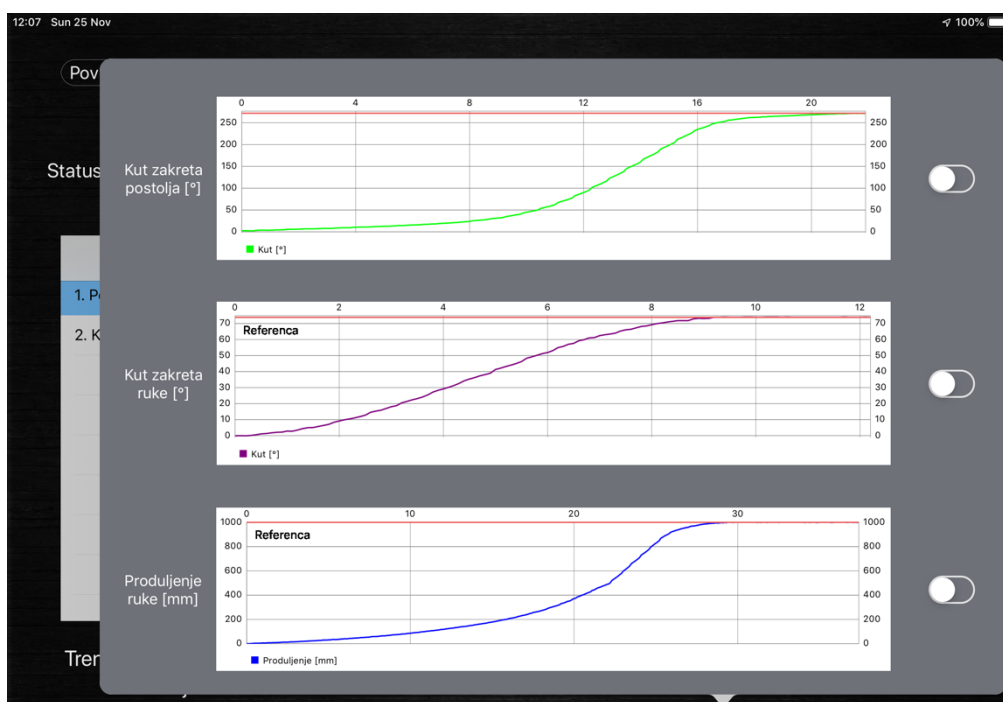
Analizom dijagrama na slici 55. možemo uočiti očekivano ponašanje hidrauličkog cilindra na konstante vrijednosti upravljačke varijable pri čemu produženje cilindra, očekivano, linearno ovisi o vremenu. Nadalje, maksimalni hod cilindra iznosa 30 mm se ostvaruje puno brže za iznos upravljačke varijable  $u_4 = 100$  ( unutar 0,3 s) u odnosu na iznos upravljačke varijable  $u_4 = 15$  ( unutar 2,5 s) što je također očekivano s obzirom na karakteristiku ventila koja je položeniija u središnjem dijelu dijagrama u odnosu na rubove.

## 5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju su prikazani eksperimentalni rezultati dobiveni upotrebom predloženog rješenja problema automatiziranog upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom. Pri tome su, kao i u prethodnom poglavlju, razmatrani slučajevi velikih i malih režima signala. Za prikaz rezultata je upotrijebljena mogućnost samostalno izrađene aplikacije EHRM PRO koja uključuje opciju praćenja dijagrama vrijednosti kuta zakreta rotacijskih stupnjeva slobode gibanja te duljine translacijskog člana.

### 5.1. Režim velikih signala reference

Na slici 56. su prikazane krivulje odziva sva tri stupnja slobode gibanja za zadane reference u režimu velikih signala, sukladno prethodno opisanim iznosima referenci u prošlom poglavlju.



Slika 56. Odziv stupnjeva slobode gibanja manipulatora na iznos reference u režimu velikih signala i primjenu izvornih parametara regulatora

Na prikazanim dijagramima na slici 56. je moguće primijetiti da dijagrami nisu vremenski sinkronizirani, već svaki dijagram ima prikazan zaseban vremenski interval. Navedeno je postignuto primjenom već objašnjene značajke zaustavljanja osvježavanja dijagrama pritiskom na tipku koja se nalazi desno uz svaki pojedinačni dijagram. Time je omogućena neovisnost dijagrama u smislu preglednosti bez obzira na različita trajanja gibanja pojedinog stupnja slobode gibanja.

Analizirajući same dijagrame, na dijagramu kuta zakreta postolja možemo vidjeti kako je osmišljeni regulator uspješno izvršio gibanje sustava za iznos promjene reference od  $270^\circ$ , vršeći ubrzanje i usporenje sustava na predviđeni način pri čemu je krivulja odziva gotovo horizontalna u početnom dijelu gibanja početka i u blizini referentne pozicije. Usporedbom eksperimentalno dobivene krivulje i simulacijske krivulje za izvorne iznose parametara regulatora ( $A = 0,005$   $B = 4$   $C = 0,05$ ), prikazane na slici 43. je moguće uočiti visoku podudarnost krivulja, i u obliku i u vremenu potrebnom za izvršenje gibanja.

Nadalje, dijagram kuta zakreta ruke također pokazuje da je uspješno izvršeno gibanje sustava na promjenu iznosa reference od  $74^\circ$ . Pri tome je također postignuta podudarnost u obliku krivulje i vremenu trajanja gibanja prikazanog eksperimentalnog odziva i simulacijskog odziva prikazanog na slici 47. za izvorne iznose parametara regulatora ( $A = 0,005$   $B = 4$   $C = 0,05$ ).

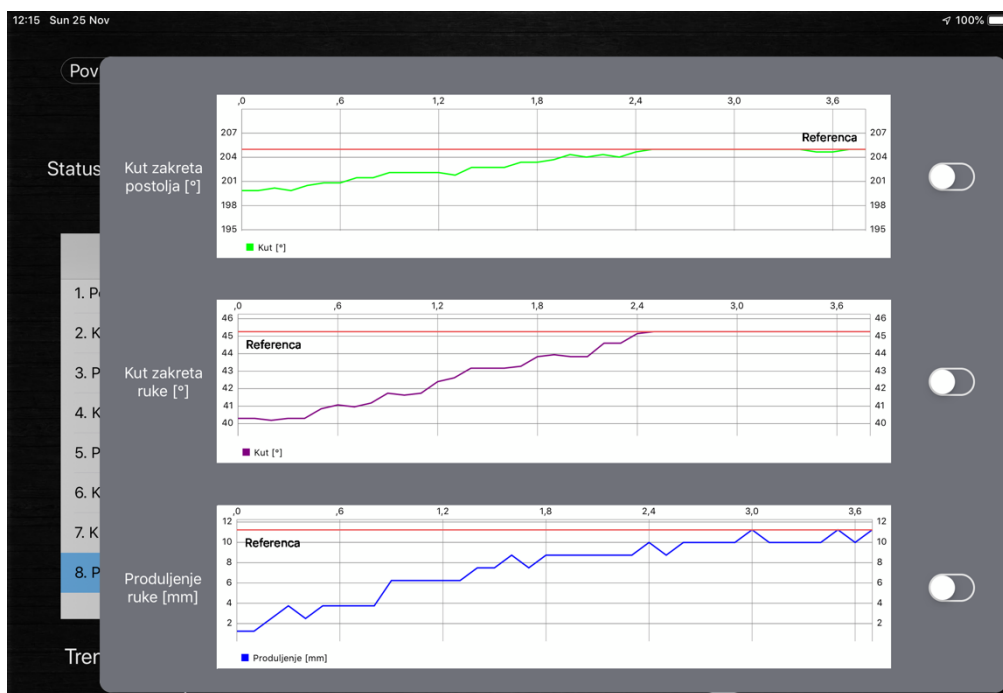
Isto se može primijetiti i kod translacijskog člana, koji je također uspješno izvršio gibanje sukladno zadanoj promjeni reference u iznosu od 1000 mm. Kao i u prošlim slučajevima, eksperimentalni odziv translacijskog člana se podudara sa simulacijskim odzivom prikazanim na slici 51. za izvorne iznose parametara regulatora ( $A = 0,01$   $B = 4$   $C = 0,1$ ).

## 5.2. Režim malih signala reference

S druge strane, za režim malih signala krivulje odziva pojedinih stupnjeva slobode gibanja su prikazane na slici 57., također prema danim vrijednostima referenci u prošlom poglavlju.

Pri tome je moguće primijetiti kako, za razliku od dijagrama prikazanih na slici 56. za zadane reference u režimu velikih signala, dijagrami na slici 57. pokazuju puno veće titranje iznosa mjernih signala. Navedeno je očekivano s obzirom na već objašnjeno titranje iznosa mjernog signala od jedne jedinice analogno-digitalnog pretvornika Arduino mikrokontrolera. Identična pojava se zbiva i u režimu velikih signala, no zbog same veličine intervala ordinate nije moguće primijetiti navedenu pojavu.

Uzimajući u obzir dijagram rotacije postolja, može se primijetiti kako sustav dostiže zadani referentni položaj sukladno zadanoj promjeni reference iznosa  $5^\circ$ . Može se također uočiti da otprilike dvije sekunde nakon dostizanja referentnog položaja dolazi do promjene iznosa mjerne varijable, što je posljedica već objašnjenog titranja mjenog iznosa. Nadalje, uspoređujući prikazani eksperimentalni odziv sa simulacijskim odzivom, može se primijetiti kako oblik krivulje odstupa od simulacijskog odziva unutar titranja varijable uz jednako potrebno vrijeme za dostizanje referentnog položaja.



**Slika 57. Odziv stupnjeva slobode gibanja manipulatora na iznos reference u režimu malih signala i primjenu izvornih parametara regulatora**

U slučaju rotacije ruke manipulatora, također je moguće primijetiti titranje varijable koje je vrlo uočljivo s obzirom na mali interval prikazan na osi ordinate. Pri tome je bitno napomenuti kako realan odziv na manipulatoru ne pokazuje nikakve trzaje koji bi mogli biti naznačeni navedenim titranjem, već je to potpuno ovisno o načinu očitavanja signala mjernih komponenti primjenom Arduino mikrokontrolera. Kao i u slučaju rotacije postolja, usporedbom eksperimentalno dobivene krivulje i krivulje simulacijskog odziva za izvorne parametre regulatora ( $A = 0,005$   $B = 4$   $C = 0,05$ ), se može uočiti sličnost navedenih krivulja. No, eksperimentalni odziv rotacije ruke, u usporedbi sa simulacijskim odzivom, je trajao ipak nešto duže. Pri tome je pretpostavka da je razlog navedenoj pojavi prisutnost već spominjanih efekata "stick-slip" trenja koje je izraženo u slučaju drugog stupnja slobode gibanja (vidi potpoglavlje 2.1.1.)

Analizom krivulje odziva translacijskog člana se mogu vidjeti puno veća titranja mjerne varijable od onih koja su se pojavljivala kod rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Pri tome je zadana promjena reference od 10 mm, za razliku od simulacijski zadane promjene reference iznosa 5 mm, kako bi se osim samih prikazanih titranja varijable omogućila i vizualna interpolacija podataka. S obzirom da je translacija ruke omogućena teleskopskim cilindrom maksimalnog hoda iznosa 1000 mm, puno je manja moguća rezolucija mjerenja, uzimajući u obzir upotrebu 10-bitnog analogno-digitalnog pretvornika. U usporedbi s time, rotacija postolja je određena kutom zakreta od  $270^\circ$ , dok je kut rotacije ruke određen maksimalnim kutom

zakreta iznosa  $74^\circ$ , što znači da je rezolucija mjerenja drastično manja u slučaju translacijskog člana, nego u slučaju rotacijskih članova (vidi potpoglavlje 2.2.1.3). Navedeno je time vidljivo i većim titranjem mjerene varijable u dijagramu s obzirom da na mali prikazani interval osi ordinate u režimu malih signala.

Radu je također priložen i video uradak na kojemu je moguće vidjeti cjelokupnu operaciju automatiziranog upravljanja manipulatorom pri obavljanju zadatka premještanja predmeta mase 70 kg sa zamišljenog obradnog mjesta na drugu poziciju u kojemu je moguće vidjeti realne performanse osmišljenog sustava upravljanja.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je pružen tijek razvoja sustava s ciljem omogućavanja automatiziranog upravljanja sustavom elektrohidrauličkog robotskog manipulatora s tri stupnja slobode gibanja i hidraulički aktuiranom prihvatnicom. Time je ovim radom ostvaren krajnji cilj omogućavanja automatiziranog upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom poštujući pritom zadane zahtjeve u vezi eliminacije trzaja ruke manipulatora i predmeta kojeg manipulator prenosi. U sklopu rada su dane osnovne informacije o načinu aktuacije tri stupnja slobode gibanja koje sadrže rotaciju postolja manipulatora, rotaciju ruke te translaciju ruke manipulatora te su osmišljene metode prilagodbe signala mjernih komponenti varijabli stanja sustava s obzirom na primjenu Arduino mikrokontrolera. Razvijeni su nužni dijelovi sustava koji omogućavaju automatsko upravljanje manipulatorom putem tablet uređaja i bežične Bluetooth veze. Jedan od tih sustava predstavlja samostalno razvijena aplikacija za tablet uređaj naziva EHROM PRO, koja omogućuje pozicioniranje manipulatora u željenim točkama, njihovo spremanje, modifikaciju njihovih postavki te konačno i izvršenje automatskog upravljanja uz mogućnost praćenja varijabli stanja sustava. Nadalje, razvijena je regulacijska metoda za postizanje željenih stanja manipulatora koja omogućuje ostvarivanje primjerenog ubrzanja i usporenja aktuatora stupnjeva slobode gibanja s obzirom na maksimalnu nosivost elektrohidrauličkog robotskog manipulatora iznosa 200 kg. Navedena regulacijska metoda pruža mogućnost intuitivnog podešavanja odziva stupnjeva slobode gibanja manipulatora podešavanjem tri parametra, pri čemu jedan parametar određuje način ubrzanja sustava, drugi određuje početnu vrijednost upravljačke varijable sustava, dok preostali parametar određuje način usporenja sustava. Simulacijom sustava, uz primjenu eksperimentalno određenih mapa ovisnosti protoka pojedinog stupnja slobode gibanja s obzirom na iznos upravljačke varijable, se moglo vidjeti kako predloženi regulator zadovoljava postavljene zahtjeve na gibanje sustava, što je predstavljalo osnovu za opravdanost eksperimentalne provjere same upravljačke strategije. Samom eksperimentalnom provjerom je pritom potvrđena adekvatnost upotrijebljenog nelinearnog regulatora za njegovu primjenu pri automatiziranom upravljanju elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom te su gotovo u cijelosti potvrđeni i prethodno dobiveni simulacijski rezultati.

Na kraju valja istaknuti kako je osmišljeni sustav potpuno otvoren za daljnji razvoj, pružajući time mnogo tema za daljnje istraživanje mogućnosti upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom.



## LITERATURA

- [1] Žgela, D., Bežično upravljanje elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Danfoss, Technical Information, Proportional Valve Group, PVG 32, [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com) (17.10.2017.)
- [3] Arduino Mega 2560, Technical Specs, <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560#techspecs> (19.10.2017.)
- [4] Comparing the HM10 and BLE CC41a Bluetooth, <https://rydepier.wordpress.com/2015/10/22/comparing-the-hm10-and-ble-cc41a-bluetooth/> (19.10.2017.)
- [5] Data sheet: RE36 rotary magnetic shaft encoder, Issue 2, 2016., [www.rls.si](http://www.rls.si) (23.10.2017.)
- [6] Miloš, D., Robotski manipulator za velike nosivosti, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [7] Micro-Epsilon, Betriebsanleitung, wireSensor, <http://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--wireSENSOR-WPS--de.pdf> (23.10.2017.)
- [8] Šitum, Ž., Poziv na predavanje "Elektrohidraulički robotski manipulator", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

## **PRILOZI**

1. CD-R medij

## Prilog 1. CD-R medij

Na CD-R mediju su priloženi svi obrađivani aspekti ovog rada, razvijena aplikacija za iPad tablet, simulacijski modeli uz datoteke mapa ventila i konverzijske pločice, cjelokupni kod Arduino mikrokontrolera te upotrijebljene slike. Medij se nalazi u omotu na zadnjoj stranici rada.