

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Dalibor Žgela  
Nikola Rajčić  
Marin Miletić  
Hrvoje Selak  
Martin Kotarski  
Jurica Mustać

MEHATRONIČKI SUSTAVI S  
HIDRAULIČKIM, PNEUMATSKIM I  
ELEKTRIČNIM POGONIMA

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava pod vodstvom prof. dr. sc. Željka Šituma i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Mehatronički sustavi s hidrauličkim pogonom</b> .....	3
2.1. Upravljanje elektrohidrauličkog robotskog manipulatora bežičnom vezom .....	3
2.1.1. Osnovna svojstva elektrohidrauličkog robotskog manipulatora .....	4
2.1.2 Upravljački sustav elektrohidrauličkog robotskog manipulatora.....	5
2.1.3 Izrada upravljačkog sklopa za bežično upravljanje.....	6
2.1.3.1. Izrada aplikacije mobilnog uređaja .....	8
2.1.3.2. Izrada pločice međusklopa .....	11
2.1.3.3. Upravljački ormar .....	12
2.1.3.4. Upravljačka kutija .....	14
2.1.4. Budući tijek razvoja mehatroničkog sustava elektrohidrauličkog robotskog manipulatora.....	16
<b>3. Mehatronički sustavi s pneumatskim pogonom</b> .....	17
3.1. Mehatronički sustav pneumatske preše.....	18
3.1.1. Izrada postolja .....	19
3.1.2. Prijenos opterećenja .....	19
3.1.3. Pneumatski sustav preše.....	22
3.1.4. Upravljanje pneumatskom prešom.....	24
3.2. Mehatronički sustav kuglice na ploči.....	27
3.2.1. Značajke sustava kuglice na ploči .....	27
3.2.2. Nastavna maketa .....	27
3.2.3. Matematički model sustava kuglice na ploči .....	31
3.2.3.1. Euler-Lagrange-ova metoda.....	31
3.2.3.2. Dinamički model sustava .....	32
3.2.4. Prostor stanja i sinteza regulatora.....	35
3.2.4.1. Prostor stanja .....	35

3.2.4.2 Sinteza regulatora .....	39
3.2.5. Odziv sustava u zatvorenom regulacijskom krugu .....	40
3.2.6. Odzivi realnog fizikalnog sustava kuglice na ploči.....	42
3.3. Mehatronički sustav sinkroniziranog djelovanja pneumatskih cilindara .....	45
3.3.1. Pneumatski cilindri upravljani matrix ventilom.....	45
3.3.2. Tehnički opis sustava .....	46
3.3.2.1. Minijaturni pneumatski cilindri.....	46
3.3.2.2. Razvodni ventil .....	47
3.3.2.3. Klipno – koljeničasti mehanizam .....	48
3.3.2.4. Tiskana pločica.....	48
3.3.2.5. Mikokontroler.....	49
3.3.3. Izrada sustava sinkroniziranog upravljanja pneumatskim cilindrima .....	52
3.3.3.1. Izrada tiskane pločice za sinkronizirano upravljanje matrix ventilom.....	52
3.3.3.2. Izrada makete .....	53
3.3.4. Konačni izgled i rad sustava.....	54
<b>4. Mehatronički sustavi s električnim pogonom .....</b>	<b>56</b>
4.1. Mehatronički sustav kuglice na kotaču .....	56
4.1.2. Modeliranje dinamike sustava.....	57
4.1.3. Simulacija sustava .....	59
4.1.4. Izvedba realnog sustava.....	61
4.1.5. Budući planovi razvoja sustava kuglice na kotaču.....	63
<b>5. Zaključak .....</b>	<b>64</b>
<b>Zahvala .....</b>	<b>65</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>66</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>68</b>
<b>Summary .....</b>	<b>69</b>
<b>Životopis.....</b>	<b>70</b>

## Popis slika

Slika 1.1. Prikaz sastavnih elemenata mehatronike [2].....	1
Slika 2.1. Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM) .....	4
Slika 2.2. Ugrađena klipno aksijalna pumpa s "Load-sensing" funkcijom .....	5
Slika 2.3. Proporcionalni razvodni ventilski blok .....	6
Slika 2.4. Izrađeni upravljački sklop za ostvarivanje bežičnog upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom .....	7
Slika 2.5. Glavni zaslon aplikacije EHROM.....	8
Slika 2.6. Sekundarni zaslon za ostvarivanje Bluetooth veze.....	9
Slika 2.7. Prikaz glavnog zaslona aplikacije EHROM s aktiviranim tipkama.....	10
Slika 2.8. Osmišljena i izrađena pločica za prilagodbu signala .....	11
Slika 2.9. MOSFET spoj za pretvorbu niskonaponskih signala u signale prikladne za ugrađeni proporcionalni razvodni ventilski blok .....	12
Slika 2.10. Unutrašnjost upravljačkog ormara .....	13
Slika 2.11. Slika upravljačkog ormara s uključenim napajanjem .....	14
Slika 2.12. Upravljačka kutija za sigurno uključivanje i isključivanje napajanja proporcionalnog ventilskog bloka manipulatora.....	15
Slika 3.1. Mehatronički sustav pneumatske preše.....	18
Slika 3.2. Postolje preše .....	19
Slika 3.3. Gornji prihvat-pogled A .....	20
Slika 3.4. Gornji prihvat-pogled B .....	21
Slika 3.5. Donji prihvat-pogled A .....	21
Slika 3.6. Donji prihvat-pogled B .....	21
Slika 3.7. Put tlačenja preše .....	22
Slika 3.8. Pneumatska shema spajanja .....	23
Slika 3.9. Presjek cilindra [8] .....	24
Slika 3.10. Arduino Uno mikrokontroler .....	24
Slika 3.11. Senzor sile i pojačalo [9].....	25
Slika 3.12. Monostabilni razvodnik [10].....	26
Slika 3.13. Nastavna maketa sustava kuglice na ploči .....	28
Slika 3.14. Zaslon osjetljiv na dodir i žiroskop.....	29
Slika 3.15. Proporcionalni ventil [14] .....	29

---

Slika 3.16. Umjetni pneumatski mišić u kontrahiranom (gore) i opuštenom stanju (dolje) [17]	30
.....	30
Slika 3.17. Tiskana pločica za upravljanje proporcionalnim pneumatskim ventilima.....	31
Slika 3.18. Podsustav ploče.....	33
Slika 3.19. Podsustav kuglice.....	33
Slika 3.20. Blokovski dijagram prostora stanja [19].....	36
Slika 3.21. Blokovski dijagram regulatora po varijablama stanja [15].....	39
Slika 3.22. Odziv pozicije kuglice u zatvorenom krugu.....	40
Slika 3.23. Odziv kuta zakreta ploče u zatvorenom krugu.....	41
Slika 3.24. Odziv upravljačkog momenta na ploči.....	41
Slika 3.25. Odziv pozicije kuglice na nastavnoj maketi.....	42
Slika 3.26. Odziv brzine kuglice na nastavnoj maketi.....	42
Slika 3.27. Odziv kuta zakreta ploče na nastavnoj maketi.....	43
Slika 3.28. Odziv kutne brzine ploče na nastavnoj maketi.....	43
Slika 3.29. Odziv upravljačkog momenta na nastavnoj maketi.....	44
Slika 3.30. Minijaturni pneumatski cilindri SMC CDQSKB16-30DM.....	46
Slika 3.31. Brzi Matrix ventil oznake BX 758.8E2C324.....	47
Slika 3.32. Kinematička shema mehanizma [22].....	48
Slika 3.33. Mikrokontroler na eksperimentalnoj ploči za elektroniku.....	50
Slika 3.34. Tiskana pločica za sinkronizirano upravljanje matrix ventilom.....	53
Slika 3.35. Mehanički dio makete.....	54
Slika 3.36. Konačni sustav.....	55
Slika 4.1. Izrađena konstrukcija sustava kuglice na kotaču.....	57
Slika 4.2. Skica modela kuglice na kotaču.....	58
Slika 4.3. Blok dijagram sustava s regulatorom po varijablama stanja.....	60
Slika 4.4. Odziv reguliranog sustava u Simulink programu.....	61
Slika 4.5. Metalni dio konstrukcije.....	62
Slika 4.6. Spoj između motora i kotača.....	63

## **Popis tablica**

Tablica 1. Karakteristike ugrađenog senzora sile.....	26
---	----

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
<b>A</b>	-	Matrica koeficijenata sustava
<b>B</b>	-	Matrica ulaza sustava
<b>C</b>	-	Matrica izlaza sustava
<b>D</b>	-	Matrica prijenosa sustava
$D_{sr}$	mm	Srednji polumjer opruge
$F$	N	Sila opruge
$G$	$\frac{N}{mm^2}$	Modul klizanja
$H$	mm	Visina postolja
$I$	A	Struja ulaza proporcionalnog tlačnog regulatora
$J$	$kgm^2$	Dinamički moment inercije
$J_k$	$kgm^2$	Dinamički moment inercije kuglice
$L$	mm	Duljina urezanog navoja klipa cilindra
<b>K</b>	-	Matrica pojačanja
$K$	J	Ukupna kinetička energija cijelog sustava
$K_j$	J	Kinetička energija $j$ - te mase
$M$	kg	Masa kotača
$P$	J	Ukupna potencijalna energija cijelog sustava
$P_j$	J	Potencijalna energija $j$ - te mase
<b>Q</b>	-	Težinska matrica prijelaznog procesa
<b>R</b>	-	Težinska matrica energije upravljanja
$R$	m	Radijus kotača
$T_{ij}$	Nm	Upravljački moment u $i$ - toj upravljanoj koordinati za pokretanje $j$ - te mase
$T_x, T_y$	Nm	Upravljački momenti
$\mathbf{U}(t)$	Nm	Vektor ulaza sustava
$U$	V	Napon napajanja sustava
$\mathbf{X}(t)$	rad, m	Vektor varijabli stanja
$\dot{\mathbf{X}}(t)$	$\frac{rad}{s}, \frac{m}{s}$	Vektor derivacija varijabli stanja
$\mathbf{Y}(t)$	rad, m	Vektor izlaza sustava
$b$	mm	Dubina utora za noge
$d$	mm	Promjer žice
$dm$	kg	Diferencijal mase
$dt$	s	Diferencijal vremena
$f$	mm	Hod opruge

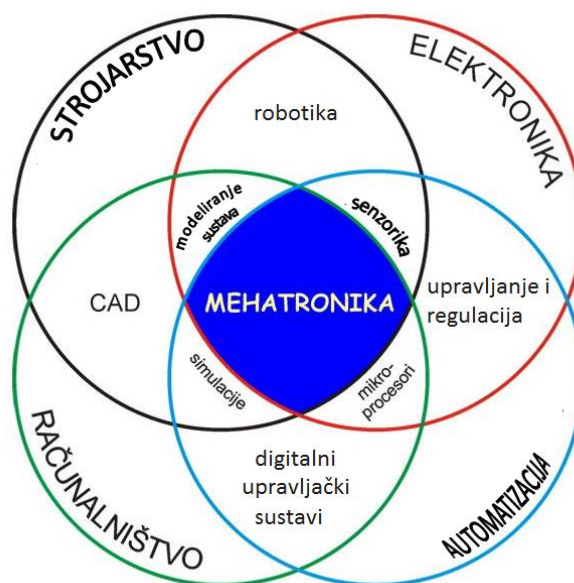


$g$	$\frac{m}{s^2}$	Gravitacijsko ubrzanje
$i$	-	Broj radnih navoja opruge
$l$	mm	Početna duljina opruge
$m$	kg	Masa
$m$	kg	Dozvoljena masa opteretivosti senzora
$m_k$	kg	Masa kuglice
$m$	-	Broj ulaznih varijabli sustava
$n$	-	Broj varijabli stanja sustava odnosno red sustava
$p$	bar	tlak
$p$	-	Broj izlaznih varijabli sustava
$q_i$	rad, m	$i$ - ta upravljana koordinata
$\dot{q}_i$	$\frac{rad}{s}, \frac{m}{s}$	Brzina $i$ - te upravljane koordinate
$\mathbf{r}(t)$	-	Vektor vođenja
$r$	m	Radijus kuglice
$t$	s	Vrijeme
$\mathbf{u}(t)$	-	Vektor upravljanja
$v$	$\frac{m}{s}$	Brzina
$\alpha$	rad	Kut zakreta kotača
$\dot{\alpha}$	$\frac{rad}{s}$	Kutna brzina zakreta kotača
$\ddot{\alpha}$	$\frac{rad}{s^2}$	Kutna akceleracija zakreta kotača
$\beta$	rad	Kut pomaka kuglice na kotaču
$\dot{\beta}$	$\frac{rad}{s}$	Kutna brzina zakreta kotača
$\ddot{\beta}$	$\frac{rad}{s^2}$	Kutna akceleracija zakreta kotača
$\delta$	mm	Debljina ploče
$\theta, \psi$	rad	Kutevi zakreta ploče
$\dot{\theta}, \dot{\psi}$	$\frac{rad}{s}$	Kutne brzine ploče
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Gustoća
$\varphi$	rad	Kut zakreta kuglice
$\dot{\varphi}$	$\frac{rad}{s}$	Kutna brzina zakreta kuglice
$\omega$	$\frac{rad}{s}$	Kutna brzina

## 1. Uvod

U posljednje vrijeme se u okvirima svjetskih razmjera može vidjeti napredak STEM revolucije. Kroz određene projekte ta revolucija uzima maha i u Hrvatskoj. Same riječi engleskog jezika koje čine akronim STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) sugeriraju kako je to revolucija multidisciplinarnih područja i početak velike ere kolaboracije znanstvenih ustanova. Mehatronika kao veliko multidisciplinarno područje predstavlja izvrstan primjer koji pruža ogroman potencijal u razvoju STEM okruženja.

Mehatronika se razvila kao prirodan slijed u evolucijskom procesu modernih konstrukcijskih metoda [1]. Kako bi se ispunili zahtjevi za određenim performansama sustava kao nužnost se pojavila integracija strojarstva, elektronike, elektrotehnike i informacijskih znanosti. U novije vrijeme se tu priključuje i biologija, kemija pa čak i znanosti društvenog područja. Upravo to predstavlja mehatroniku, simbiozu navedenih područja (slika 1.1.) pri čemu se može reći da rezultati takve suradnje nadmašuju sami zbroj pojedinih područja. Time se omogućuje stvaranje dotad nezamislivih uređaja i rješenja.



Slika 1.1. Prikaz sastavnih elemenata mehatronike [2]

Jedan od najboljih primjera mehatroničkih sustava, kao i sveti gral robotike, je humanoidni robot. Njegov razvoj bi bio nezamisliv bez inovativnih konstrukcijskih rješenja iz područja strojarstva, osmišljavanja električnih pogona iz područja elektrotehnike, razvoja raznih senzora i upravljačkih uređaja pod okriljem elektrike te programiranja sustava s ciljem razvoja umjetne inteligencije u sklopu računarstva u kolaboraciji s društvenim znanostima kao što su psihologija i filozofija.

Spoznajući važnost razvoja mehatronike i sami smo se upustili u osmišljavanje i izradu nekoliko mehatroničkih sustava pri čemu se pažnja posvetila raznolikosti vrsta sustava i korištenih aktuatora. Time se htjela naglasiti upravo raznovrsnost koja odlikuje ove sustave.

Navedeno će biti pokazano kroz mehatroničke sustave s hidrauličkim, pneumatskim i električnim pogonima koji predstavljaju upravo najčešće aktuacijske načine takvih sustava.

## **2. Mehatronički sustavi s hidrauličkim pogonom**

Mehatronički sustavi s hidrauličkim pogonima često pronalaze primjenu u situacijama u kojima se zahtijeva kompaktnost izvedbe s velikom gustoćom snage ili primjerice jednostavna izvedba linearnog gibanja. Značajna je i mogućnost pohrane energije fluida u hidrauličkim akumulatorima koji omogućuju primjenu hidraulike i u hibridnim vozilima za regeneraciju energije kočenja. S druge strane, neki od nedostataka hidraulike su niži stupanj korisnog djelovanja, pitanje ekološkog zbrinjavanja hidrauličkog fluida te složenost sustava i upravljačkih uređaja [2].

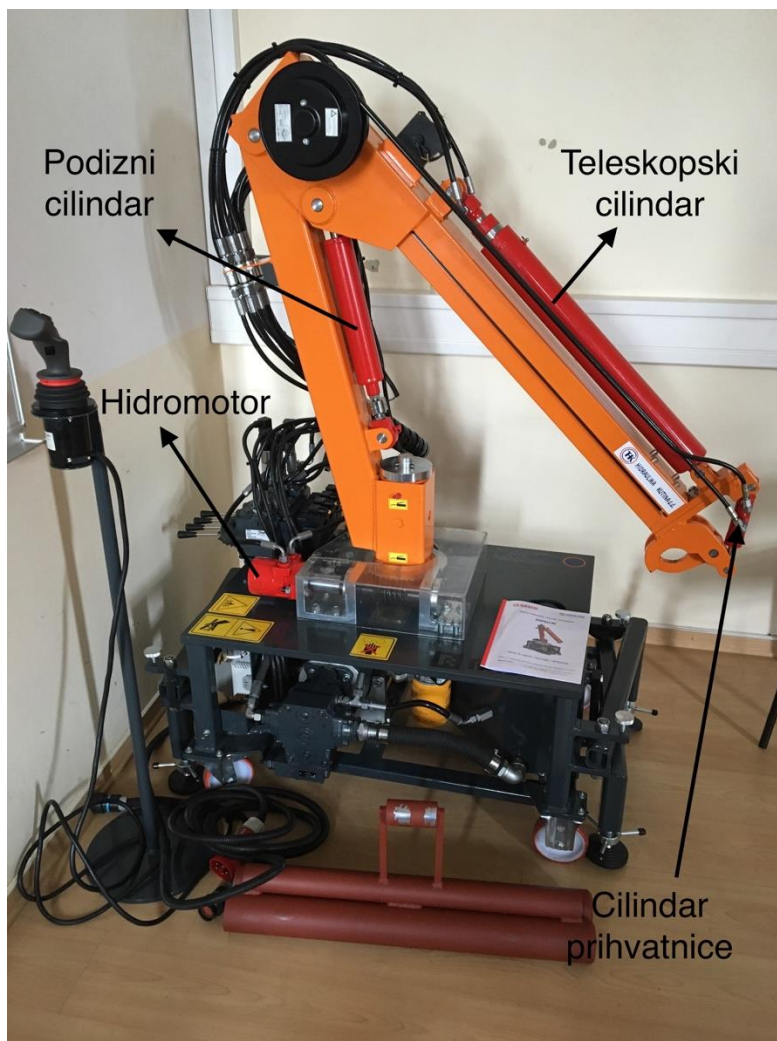
Već spomenuti stupanj korisnog djelovanja se nastoji povećati kvalitetnom izradom komponenti te novim sustavima kao što je "Load-sensing" sustav koji prilagođava protok varijabilne pumpe trenutnim zahtjevima izvršnih elemenata. Svoj doprinos razmatranju upravljačkih uređaja dat će se u nastavku kroz samostalno izrađen upravljački sklop.

### **2.1. Upravljanje elektrohidrauličkog robotskog manipulatora bežičnom vezom**

Kao što je već spomenuto u uvodu poglavlja, bit će pokazan izrađeni upravljački sklop za bežično upravljanje elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom (EHROM) preko mobilnog uređaja posredstvom Bluetooth veze. Navedeni manipulator je razvijen u Laboratoriju za automatiku i robotiku na Kateri za strojarsku automatiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje (slika 2.1.).

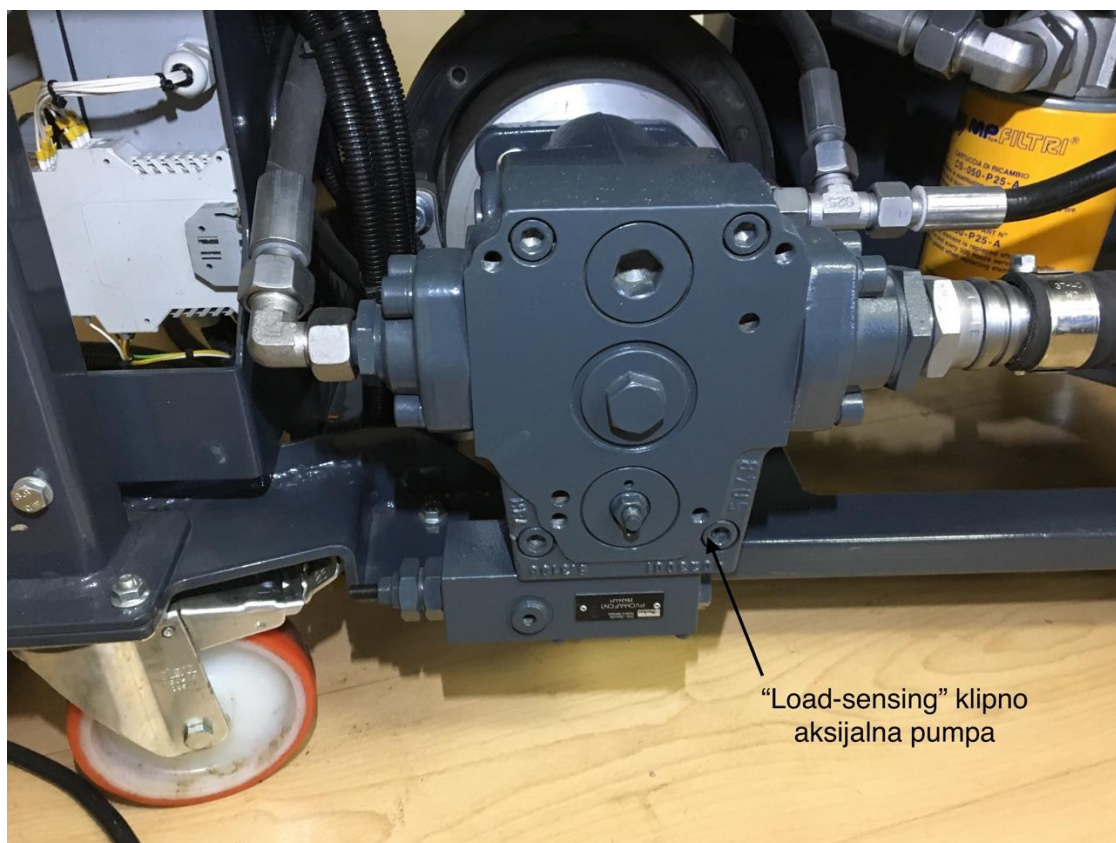
### 2.1.1. Osnovna svojstva elektrohidrauličkog robotskog manipulatora

Elektrohidraulički robotski manipulator izveden je u sfernoj strukturi što znači da su prvi i drugi stupanj slobode gibanja rotacijski, dok je treći stupanj slobode gibanja izveden translacijski. Na kraju mehaničke strukture se nalazi prihvatnica. Rotacija prvog stupnja slobode oko vertikalne osi se izvodi hidromotorom dok se rotacija ruke manipulatora (drugi stupanj slobode gibanja) izvodi podiznim dvoradnim hidrauličkim cilindrom. Translacija konzole ruke je izvedena primjenom hidrauličkog teleskopskog cilindra. I sama prihvatnica je također aktuirana hidrauličkim cilindrom. Navedeni elementi su označeni strelicama na slici 2.1.



Slika 2.1. Elektrohidraulički robotski manipulator (EHROM)

Protok fluida osigurava klipno-aksijalna pumpa varijabilnog volumena s ugrađenom "Load-sensing" funkcijom koja osigurava protok fluida prema zahtjevima izvršnih članova. Time se u stanju neaktivnosti sustava štedi energija i značajno povećava stupanj korisnog djelovanja sustava. Upravo je "Load-sensing" sustav trenutno vrlo istaknut u inovacijama u području hidraulike čime se dodatno prepoznaje njegov značaj.

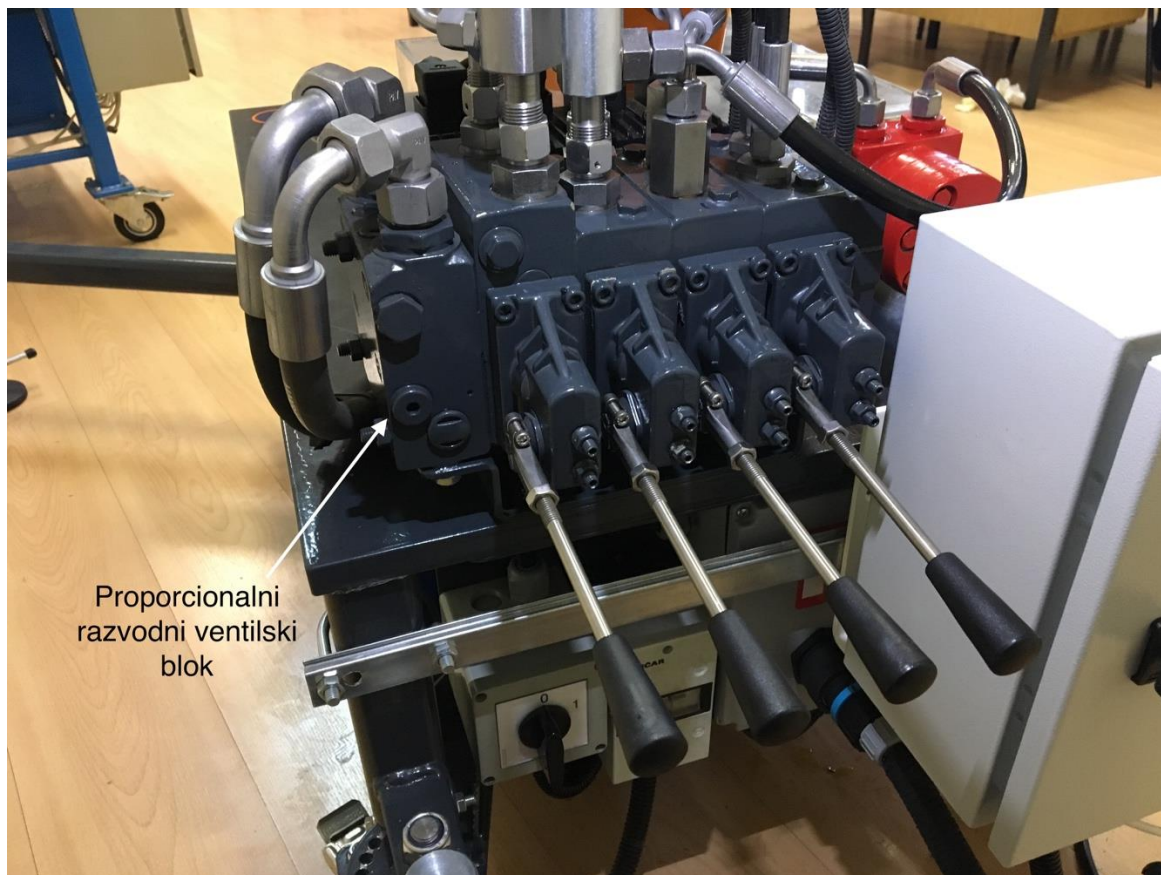


**Slika 2.2. Ugrađena klipno aksijalna pumpa s "Load-sensing" funkcijom**

### **2.1.2 Upravljački sustav elektrohidrauličkog robotskog manipulatora**

Izvorni upravljački sustav elektrohidrauličkog robotskog manipulatora čini proporcionalni razvodni ventil (slika 2.3.) čije se upravljanje moglo provoditi polugama na samom ventilskom bloku ili upravljačkom palicom (joystickom) povezanom s manipulatorom preko 35-pinskim Deutsch konektorom.





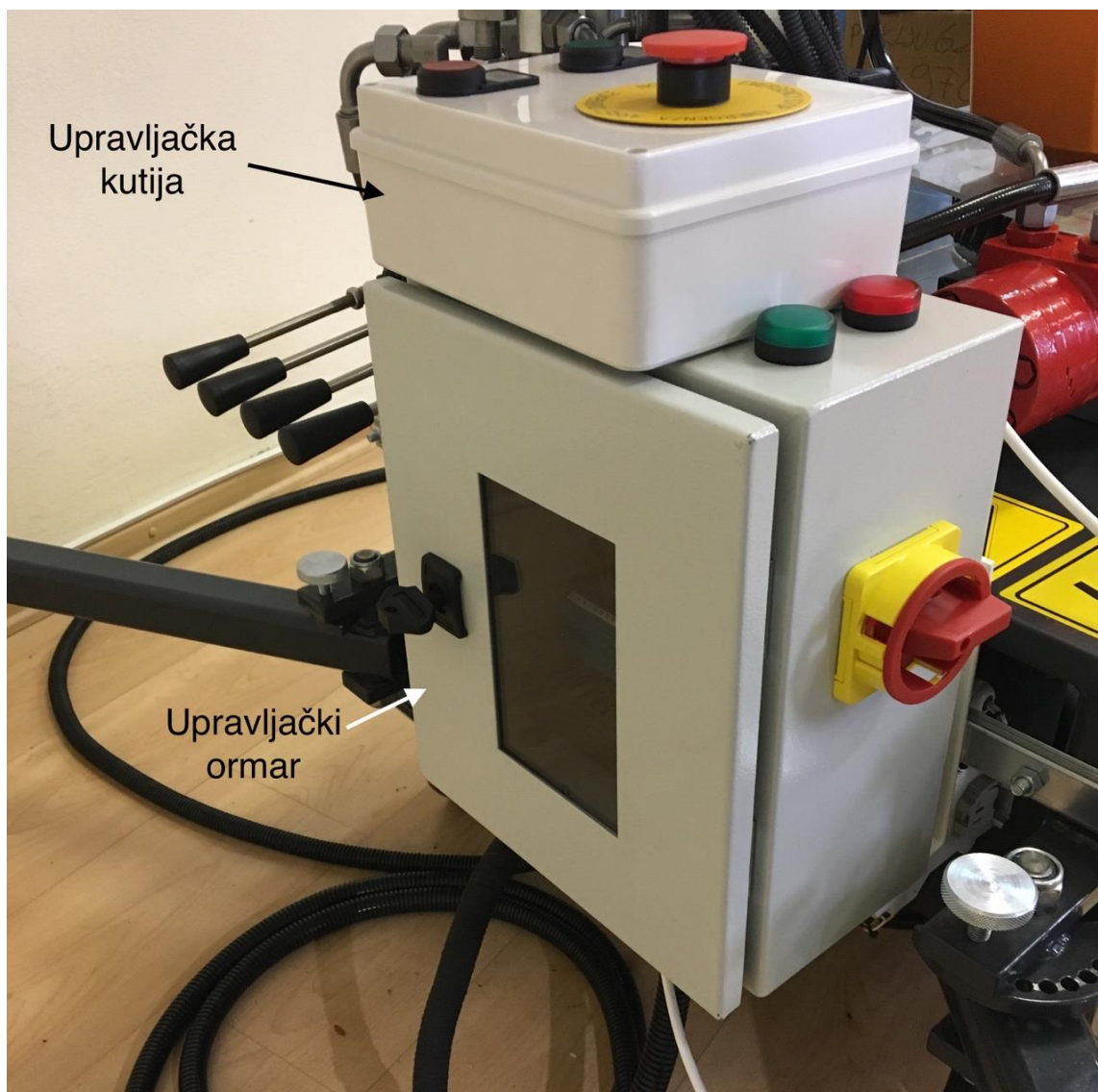
**Slika 2.3. Proporcionalni razvodni ventilski blok**

Navedeni proporcionalni ventilski blok je upravljan naponskim signalom u rasponu od 0 do 24 V DC, pri čemu se neutralni položaj kotve ventila, a time i zaustavljanje protoka ostvaruje pri naponu 12 V DC. Navedene činjenice su uzete u obzir prilikom konstruiranja međusklopovlja i programa potrebnih za ostvarivanje bežičnog upravljanja manipulatorom.

### **2.1.3 Izrada upravljačkog sklopa za bežično upravljanje**

Izrada sklopa za bežično upravljanje vidljivog na slici 2.4. se sastoji od četiri glavna dijela. Za ostvarivanje komunikacije bilo je potrebno osmisliti aplikaciju na mobilnom uređaju za zadavanje željenih upravljačkih varijabli te programirati Arduino mikrokontroler uz HM-10 Bluetooth modul za primanje i interpretaciju poslanih upravljačkih signala. Primljene zahtjeve upravljačkih varijabli je potrebno proslijediti na upravljačke naponske ulaze proporcionalnog ventilskog bloka pri čemu je nužna upotreba međusklopa za konverziju signala logičke razine

mikrokontrolera na istosmjerni napon u rasponu od 0 V do 24 V. Konačno, potrebno je osigurati zaštitu navedenog mikrokontrolera i međusklopovlja unutar kućišta upravljačkog ormara i osigurati mogućnost sigurnog uključivanja i isključivanja kretnji manipulatora za što je upotrijebljena upravljačka kutija.



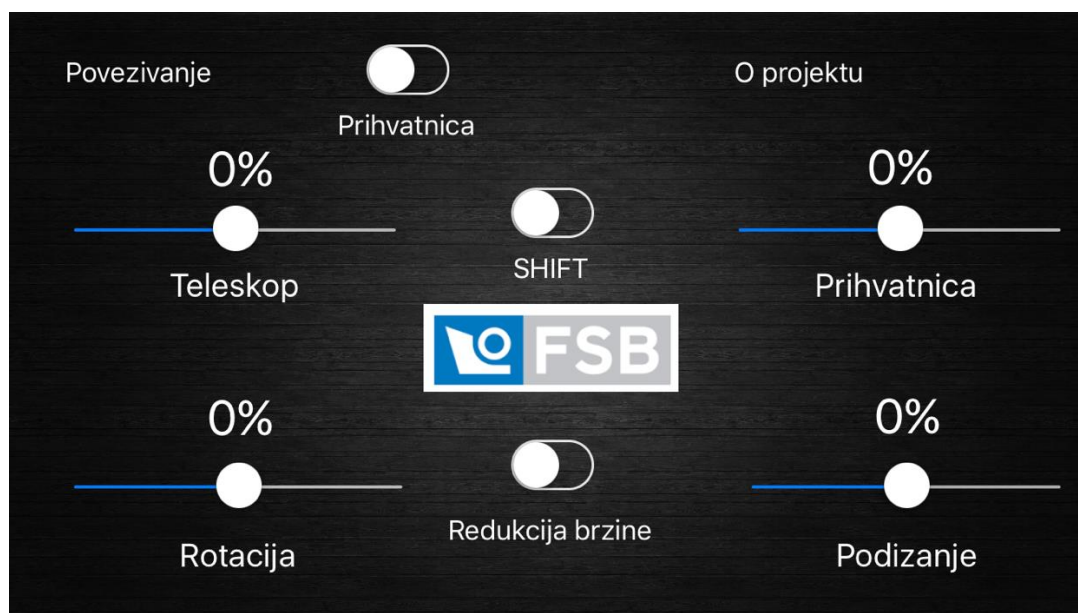
**Slika 2.4. Izradeni upravljački sklop za ostvarivanje bežičnog upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom**



### 2.1.3.1. Izrada aplikacije mobilnog uređaja

Za omogućavanje odabira protoka usmjerenog ka odabranim izvršnim elementima, a time i upravljanja njihovom brzinom, osmišljena je aplikacija naziva EHROM, namijenjena za uređaje tvrtke Apple i iOS operacijski sustav. Programirana je u programskom paketu Xcode, namijenjenom za upravo navedene uređaje i odgovarajuće operativne sustave. Aplikacija je testirana na mobilnom uređaju sa zaslonom osjetljivim na dodir tvrtke Apple, modela iPhone 6S.

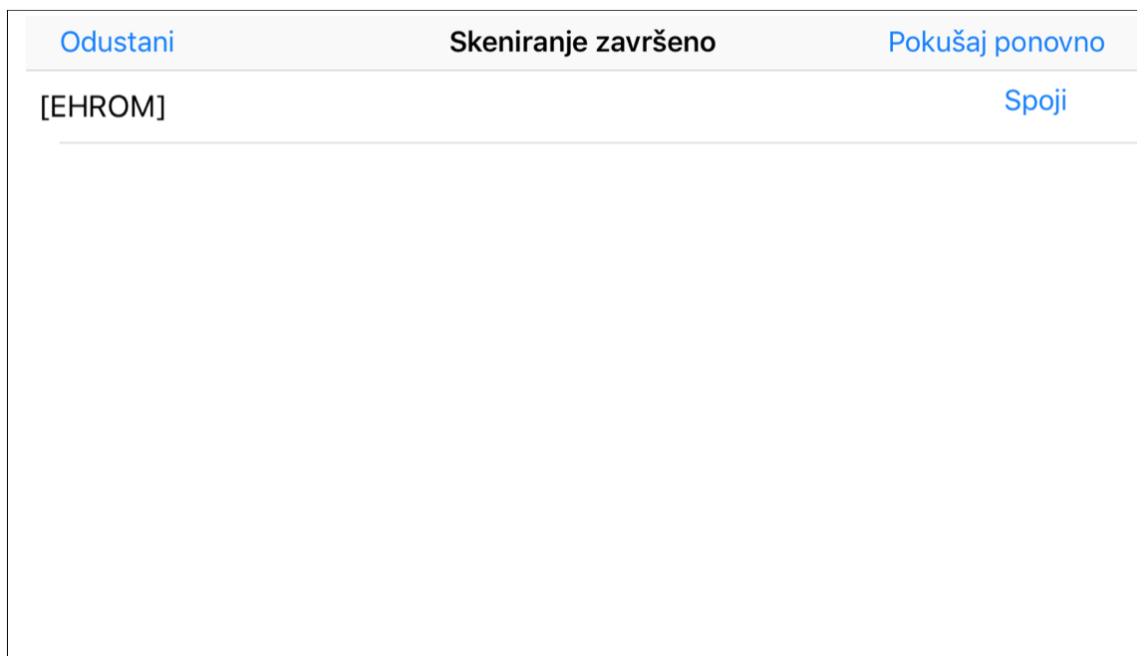
Programiranje aplikacije se može podijeliti u dva dijela, izradu korisničkog sučelja te programiranje funkcija koje se aktiviraju pojedinim radnjama korisnika. Za osiguranje jednostavnog i preglednog načina odabira željenih upravljačkih varijabli pojedinih izvršnih elemenata odabrani su klizači (slika 2.5.)



Slika 2.5. Glavni zaslon aplikacije EHROM

Kako bi se omogućilo pokretanje izvršnih elemenata manipulatora navedenim klizačima, nužno je prvo provesti korak povezivanja s Bluetooth modulom povezanim s Arduino mikrokontrolerom na samome manipulatoru. Ulaskom u podizbornik *Povezivanje*, vidljivom na slici glavnog zaslona (slika 2.5.) otvara se sekundarni zaslon u kojemu se omogućuje

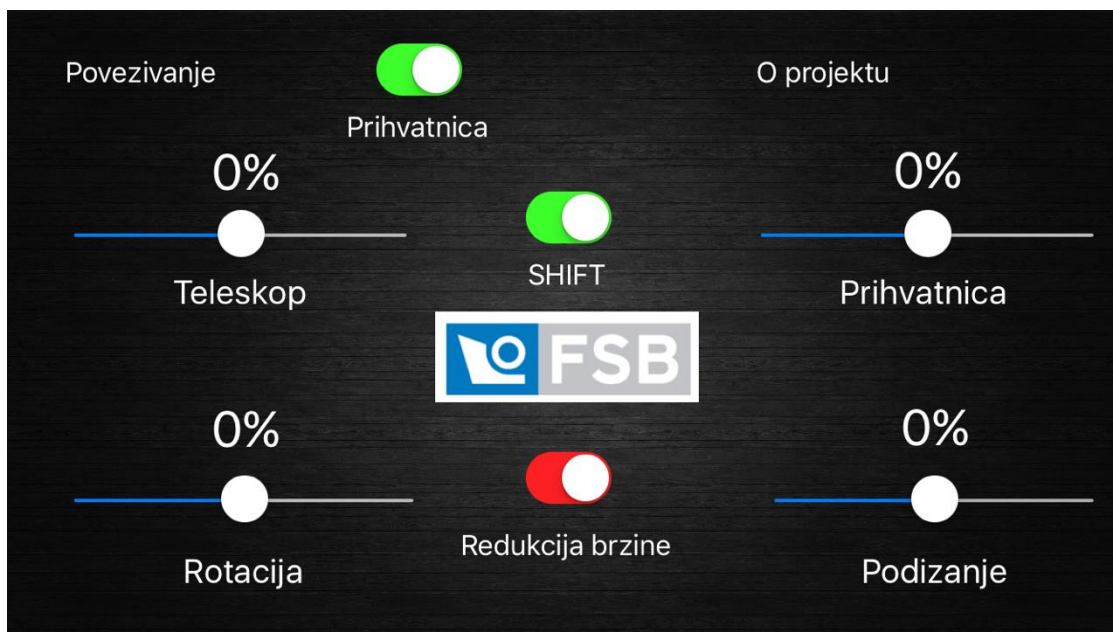
odabir odgovarajućeg modula za povezivanje s Bluetooth vezom (slika 2.6.). Pritiskom na tipku *Spoji* mobilni uređaj se Bluetooth vezom povezuje s mikrokontrolerom.



**Slika 2.6. Sekundarni zaslon za ostvarivanje Bluetooth veze**

Po uspješnom povezivanju, dolazi do automatske promjene zaslona na glavni zaslon prikazan na slici 2.5 pri čemu se klizačima omogućuje upravljanje stupnjevima slobode gibanja te prihvatnicom elektrohidrauličkog robotskog manipulatora.

Kako bi se osigurao prijenos korisnikovih zahtjeva samo u trenucima kada se gibanje namjerno želi provesti, u aplikaciju su ugrađene određene sigurnosne mjere. Navedene sigurnosne mjere su standardno uključene kod privjesaka za učenje industrijskih robota. Za sprječavanje nehotećnog prijenosa upravljačkih komandi, nužno je pritisnuti tipku *SHIFT* pri čemu ona mijenja boju u zelenu kao što je prikazano na slici 2.7. Puštanjem svih klizača, tipka *SHIFT* se ponovno vraća u neaktivno stanje čime se onemogućuje slanje upravljačkih naredbi prilikom nehotećnog pomicanja klizača koje se može dogoditi tijekom rukovanja mobilnim uređajom sa zaslonom osjetljivim na dodir.



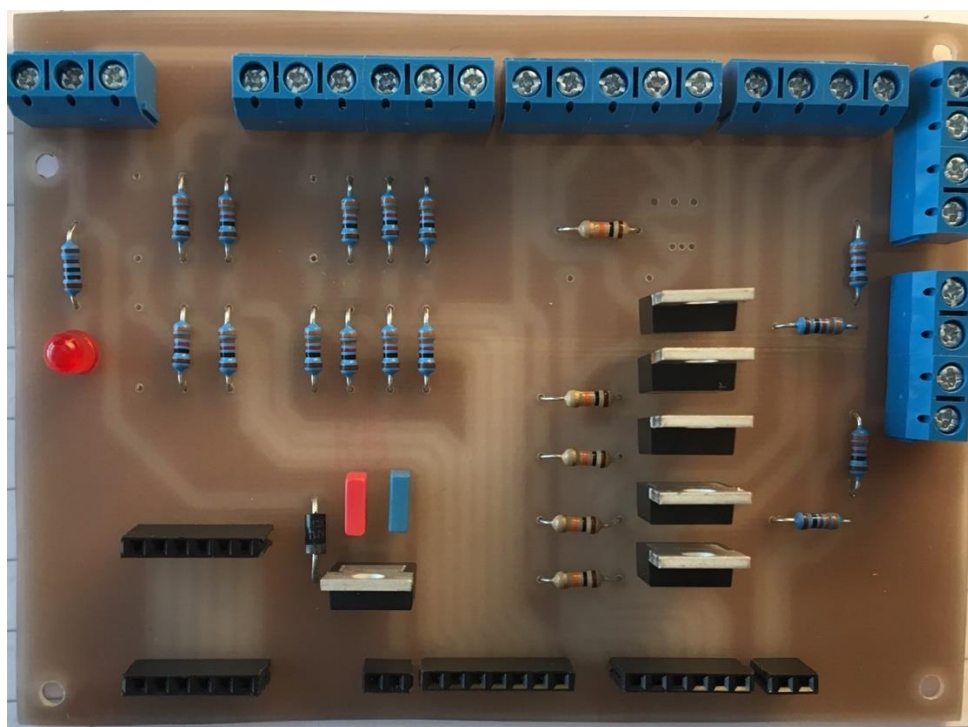
Slika 2.7. Prikaz glavnog zaslona aplikacije EHRM s aktiviranim tipkama

S obzirom da je robotski manipulator konstruiran za prijenos predmeta velikih masa do 200 kg, za mijenjanje stanja prihvatnice je nužno aktivirati i tipku *Prihvatanica* uz prethodno aktiviranu tipku *SHIFT*. Puštanjem klizača prihvatnice dozvolava se automatski isključuje čime se onemogućuje nenamjerno ispuštanje tereta. Za precizno pozicioniranje ruke manipulatora može se iskoristiti i tipka *Redukcija brzine*, čime se brzina izvršnih članova smanjuje za 50%. Za prijenos podataka Bluetooth vezom se koristi najnoviji standard 4.0 naziva BLE čime se omogućuje niskoenergetski prijenos podataka. Za primanje upravljačkih komandi odaslanih sa mobilnog uređaja zadužen je Bluetooth modul HM-10 koji primljene kodirane poruke prosljeđuje Arduino mikrokontroleru. Kodirana poruka se sastoji od slovačane oznake i cijelog broja, pri čemu slovačana oznaka određuje na koji se izvršni element primljena poruka odnosi, dok broj uz nju određuje zahtjev za brzinom traženog izvršnog člana. Slovačana oznaka može biti *A*, *B*, *C* ili *D* pri čemu se oznaka *A* odnosi na prvi stupanj slobode gibanja (rotacija postolja), oznaka *B* na drugi stupanj slobode gibanja (rotacija ruke), oznaka *C* na treći stupanj slobode gibanja (translacija ruke) i oznaka *D* na prihvatnicu na kraju mehaničke strukture

manipulatora. Broj uz slovčanu oznaku se može kretati u intervalu od -100 do 100 te se njime određuje zahtjev za brzinom izvršnog elementa prema slovčanoj oznaci. Broj 0 označuje zahtjev za mirovanjem odabranog izvršnog elementa, dok interval od 0 do 100 označuje zahtjev za aktuacijom izvršnog elementa u smjeru suprotnom od onog za vrijednosti u intervalu od -100 do 0. Navedeni cijeli broj predstavlja zapravo zahtjev za protokom na razvodnom ventilu pripadajućeg izvršnog elementa čime je onda određena i brzina aktuacije tog elementa na način da veća apsolutna vrijednost označava zahtjev za većom brzinom gibanja elementa u, već prema predznaku, odabranom smjeru.

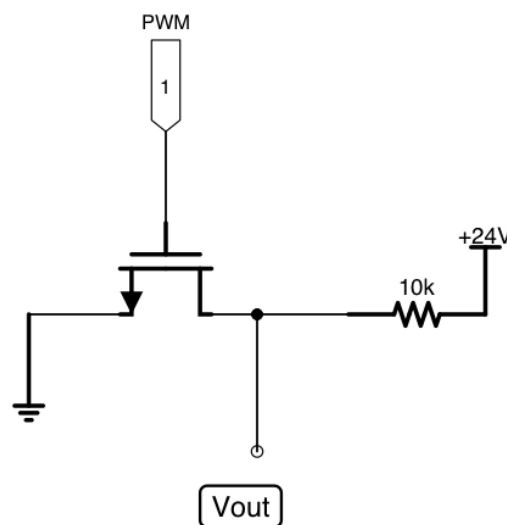
### 2.1.3.2. Izrada pločice međusklopa

S obzirom na već opisane karakteristike upravljanja proporcionalnim razvodnim ventilom, nužno je prilagođenje niskonaponskih TTL signala Arduino mikrokontrolera na istosmjerni naponski signal napona od 0 do 24 V. S tim ciljem je samostalno osmišljena i izrađena upravljačka pločica (slika 2.8.)



Slika 2.8. Osmišljena i izrađena pločica za prilagodbu signala

Zahtjevi za brzinama gibanja pojedinih izvršnih elemenata primljenih Bluetooth vezom se mapiraju na prikladan iznos pulsno širinske modulacije na izlaznim pinovima mikrokontrolera. Ovisno o popunjenosti ciklusa modulacije se utječe na otvaranje MOSFET tranzistora, a time i izlaznog napon  $V_{out}$  (slika 2.9.) Izlazni napon  $V_{out}$  predstavlja ulazni upravljački signal za proporcionalni razvodni ventilski blok.

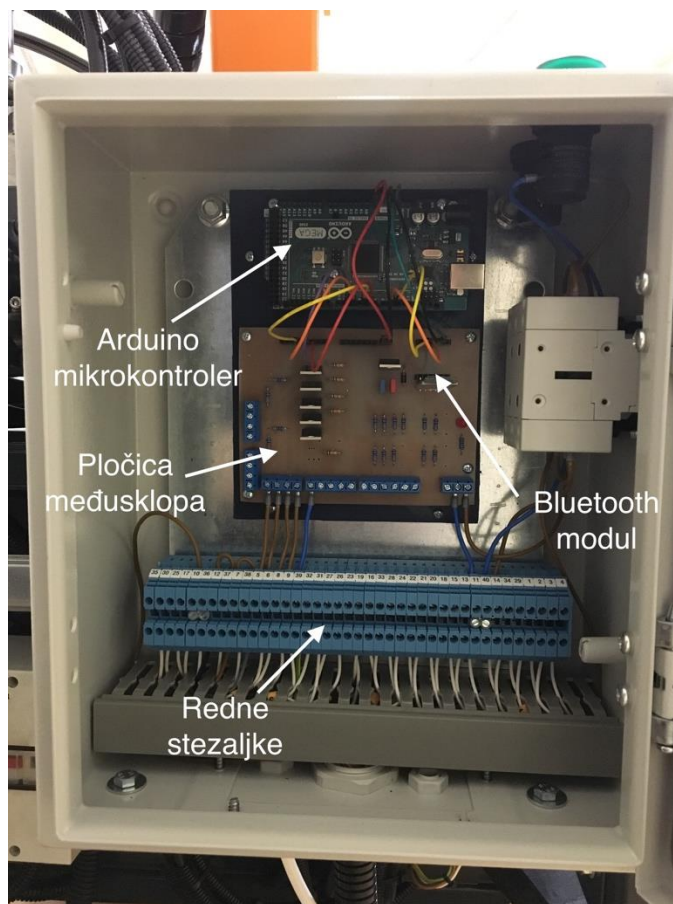


**Slika 2.9. MOSFET spoj za pretvorbu niskonaponskih signala u signale prikladne za ugrađeni proporcionalni razvodni ventilski blok**

### 2.1.3.3. Upravljački ormar

Za siguran smještaj Arduino mikrokontrolera, Bluetooth modula i pločice međusklopa te omogućavanje pristupa spojnim žicama 35-pinskog Deutsch konektora, navedene komponente su ugrađene u upravljački ormar prikazan i označen na slici 2.4.

Unutrašnjost upravljačkog ormara se može vidjeti na slici 2.10. , gdje je također vidljiv i raspored već spomenutih komponenti.



**Slika 2.10. Unutrašnjost upravljačkog ormara**

Redne stezaljke omogućuju jednostavan i uredan pristup svim žicama 35-pinskog Deutsch konektora čime se omogućava pristup svim komponentama upravljačkog i mjernog sustava manipulatora.

Arduino mikrokontroler i pločica međusklopa sa Bluetooth modulom su montirani na podlogu ispisanu na 3D printeru koja je potom ugrađena na nosivu ploču upravljačkog ormara zajedno s kabelskom kanalicom i setom rednih stezaljki.

Uključenje napajanja upravljačkog ormara se odvija grebenastom sklopkom prikazanom na slici 2.4. Signal uključenog napajanja predstavlja zelena svjetiljka na vrhu ormara prikazana na slici 2.11.





**Slika 2.11. Slika upravljačkog ormara s uključenim napajanjem**

#### **2.1.3.4. Upravljačka kutija**

Uključenjem napajanja upravljačkog ormara ujedno dolazi do uključenja napajanja upravljačke kutije (slika 2.12.) . Upravljačka kutija služi za uključivanje i isključivanje napajanja proporcionalnog ventilskog bloka, a time i mogućnosti pokretanja stupnjeva slobode gibanja manipulatora ili prihvatnice, sa sigurne udaljenosti izvan radnog područja manipulatora.



**Slika 2.12. Upravljačka kutija za sigurno uključivanje i isključivanje napajanja proporcionalnog ventilskog bloka manipulatora**

U početnom stanju je napajanje ventilskog bloka uvijek isključeno što je signalizirano crvenim svjetlom tipke START.

Za uključivanje napajanja ventilskog bloka potrebno je pritisnuti tipku START uz uvjet da se ruka manipulatora ne nalazi u nedozvoljenom položaju s obzirom na prvi stupanj slobode gibanja. U tom slučaju prekidač graničnog položaja ne dozvoljava promjenu stanja napajanja ventilskog bloka. Ukoliko je ruka manipulatora u dozvoljenom položaju, tipka START se osvjetljava zelenom bojom te je moguće započeti upravljanje manipulatorom putem mobilnog uređaja.

Za slučaj opasnosti, ugrađen je i lako dostupni prekidač za slučaj opasnosti koji se intuitivno brzo aktivira pritiskom ruke čime se manipulator zaustavlja gotovo trenutno.



#### **2.1.4. Budući tijek razvoja mehatroničkog sustava elektrohidrauličkog robotskog manipulatora**

Cilj daljnjeg razvoja sustava za bežično upravljanje je postizanje automatskog upravljanja. S obzirom da predstavljeni manipulator ima ugrađene mjerne komponente koje mu omogućuju praćenje procesnih veličina (pozicije, tlaka hidrauličkog fluida u dovodnim crijevima, sile) planira se uspostavljanje povratne veze tih veličina ka mobilnom uređaju, također putem Bluetooth veze. Time bi se, uz razvoj algoritma za regulaciju, omogućilo djelovanje mobilnog uređaja u svrhu regulacije procesnih veličina, pri čemu tehničke značajke mobilnog uređaja daleko nadmašuju brzine standardno dostupnih programabilno-logičkih kontrolera. Time bi se omogućio daljnji razvoj aplikacije EHRM ka funkcijama koje odlikuju klasične privjeske za učenje industrijskih robota čime bi se programiranje djelovanja ovog manipulatora moglo učiniti u svega nekoliko minuta na jednostavan i intuitivan način.

### 3. Mehatronički sustavi s pneumatskim pogonom

Mehatronički sustavi s pneumatskim pogonom vrlo su česta pojava u industrijskom okolišu gdje su prisutni zahtjevi za jednostavnim i čistim pogonom. Primjer takve industrije jest prehrambena industrija. Mehatronički sustavi s pneumatskim pogonom se često susreću i u strojevima za automatsku montažu dijelova proizvoda, gdje se s pneumatskim cilindrima jednostavno ostvaruje linearno gibanje potrebno za izuzimanje ili montažu komponenti sustava. Općenito se pneumatski pogoni javljaju u slučajevima gdje su visoki zahtjevi za sigurnost, ekološku prihvatljivost, ostvarivanje manjih sila prilikom djelovanja i velikim brzinama aktuatora što su upravo glavne značajke pneumatike. Dodatne prednosti pneumatike su neosjetljivost na opterećenje, niska gustoća medija (nema hidrauličkog udara), povoljno održavanje i činjenica da nema potrebe za povratnim vodom zraka prilikom korištenja pneumatskih pogona što smanjuje zahtjeve na prostor i kompleksnost sustava [4]. Neki od nedostataka pneumatskih pogona su niski tlakovi (do 15 bar-a) odnosno ne mogu se ostvariti velike sile kao s hidrauličkim pogonima, zatim ograničena točnost pozicioniranja, ograničen iznos pokretane mase, niska krutost sustava i zahtjevni su za automatsku regulaciju (zbog nelinearnosti uzrokovanih kompresibilnošću zraka, trenjem, promjenama tlaka napajanja i dr.) [5]. Upravo zbog zadnjeg navedenog nedostatka pneumatskih pogona, pogodni su za istraživanje i razvijanje složenih algoritama upravljanja odnosno za edukaciju studenata iz područja mehatronike i automatike. Iz tog razloga izrađena su dva pneumatska sustava, mehatronički sustav pneumatske preše i mehatronički sustav kuglice na ploči na kojima su implementirani upravljački algoritmi za regulaciju sustava s pneumatskim pogonom. Izrađeni sustavi obuhvaćaju sve probleme na koje se nalazi prilikom rada s pneumatskim sustavima i općenito prilikom automatizacije proizvodnih sustava. Pogodni su i za edukaciju studenata s temama kao što su objašnjenje teorije upravljanja multivarijabilnih nelinearnih sustava, zatim

nestabilnost sustava u otvorenoj petlji regulacije, podupravljivost (sustav ima više stupnjeva slobode gibanja nego upravljačkih varijabli), stlačivost zraka i sl. Dodatno će biti prikazan i mehatronički sustav s više pneumatskih cilindara upravljanih matrix ventilom, kao primjer rješenja problema sinkronizacije rada pneumatskih cilindara.

### 3.1. Mehatronički sustav pneumatske preše



Slika 3.1. Mehatronički sustav pneumatske preše

### 3.1.1. Izrada postolja

Projektiranje sustava pneumatske preše idejno je riješeno s postoljem, oprugom kao prijenosnikom sile, senzorom sile kojim se ostvaruje povratna veza te pneumatskim cilindrom kao aktuatorom i proporcionalnim tlačnim regulatorom kao izvršnim članom sustava.



Slika 3.2. Postolje preše

Radi dobivanja lakše konstrukcije, ploče su načinjene od iverice. Prema katalogu proizvođača standardne su debljine  $\delta=40$  mm. Kombinacijom glodanja i tokarenja ploče su prilagođene stupnjevanom cilindru i provrtima za vijke. Noge su standardni aluminijski profili (20×20 mm). Spoj dviju ploča ostvaren je oblikom, utorima za noge dubine  $b=20$  mm na obje ploče i vijčano na sve četiri noge pneumatske preše. Ukupna visina postolja iznosi  $H=234$  mm.

### 3.1.2. Prijenos opterećenja

Kao način prijenosa opterećenja odabrana je tlačna opruga proizvođača '*Omega opruge*'. Iznos opterećenja ovisi o promjeru cilindra i izlazu proporcionalnog tlačnog regulatora, stoga slijedi proračun karakteristika opruge [6].

Ulazni podaci su:

$F$  - sila koja opterećuje oprugu [N]  $\rightarrow 500$  N

$l$  - početna duljina opruge [mm]  $\rightarrow 110$  mm

$f$  - opruženje (hod opruge) [mm]  $\rightarrow 60$  mm

$d$  - promjer žice [mm]  $\rightarrow 5$  mm

$D_{sr}$  - srednji promjer opruge [mm]  $\rightarrow 50$  mm

$G$  - modul klizanja [ $N/mm^2$ ]  $\rightarrow 83\,000$   $N/mm^2$

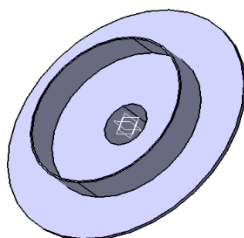
Prema sljedećem izrazu dobijamo potreban broj radnih navoja opruge:

$$i = \frac{G \cdot d^4 \cdot f}{8 \cdot D_{sr}^3 \cdot F} = 6 \quad (3.1)$$

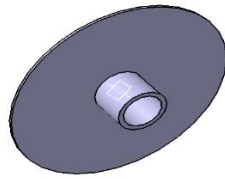
Iznos potrebne sile prešanja:

$$F = p \cdot A = 500 \text{ N} \quad (3.2)$$

S obzirom da je odabrana opruga tlačna potrebno je odabrati način uležištenja koji je izrađen iz poliamidne mase-sipasa. Sipas je industrijska plastika čiji je iznos dopuštenog naprezanja sličan čeliku, međutim manje mase. Uležištenje opruge je osmišljeno s gornjim i donjim prihvatom i svaki od njih ima dvije namjene. Gornji prihvat je istokaren iz jednog dijela i s gornje strane ima urezan fini navoj M16x1.5 [7], dok je s donje strane uležištenje.

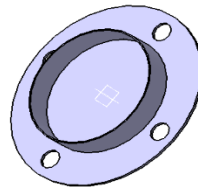


Slika 3.3. Gornji prihvat-pogled A

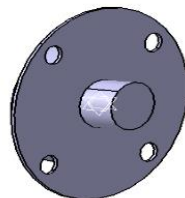


**Slika 3.4. Gornji prihvat-pogled B**

Donji prihvat sadrži vijenac koji je prilagođen prolaznim vijcima sa svoj četiri provrta. S gornje strane je uležištenje, a s donje strane je valjak koji ostvaruje pritisak na senzor. Visina potrebna za ostvarenje kontakta senzora sile dobijena je pomoću matice i kontramatice.



**Slika 3.5. Donji prihvat-pogled A**



**Slika 3.6. Donji prihvat-pogled B**

Potrebno je napomenuti kako je sustav pneumatske preše osmišljen i modeliran u programskom paketu *CATIA V5* pa je i dio slika priloženih elemenata dan u virtualnom obliku. Sa svim gore navedenim i opisanim elementima konačno je riješen i montiran put tlačenja preše koja je prikazana na slici 3.7. u realnoj izvedbi.

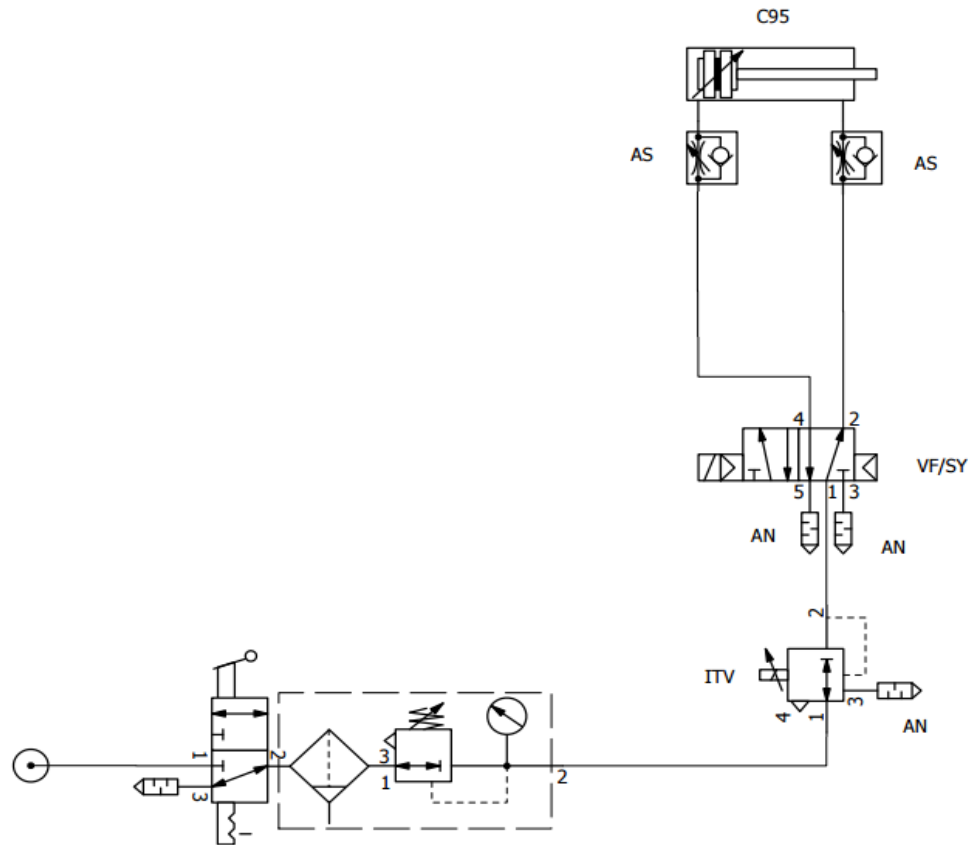


Slika 3.7. Put tlačenja preše

### 3.1.3. Pneumatski sustav preše

Preša sadrži tri pneumatska elementa kojima se ostvaruje sila pneumatske preše: pneumatski cilindar, proporcionalni tlačni regulator i monostabilni razvodnik. Cijela shema spajanja započinje od spremnika sa zrakom na kojem se nalazi kompresor i predstavlja izvor napajanja pneumatskih elemenata standardiziran u industriji na iznos 5 bara izlaznog tlaka.

Proporcionalni tlačni regulator sadrži tri ulaza: napajanje kompresora, prigušnik buke i izlaz referentne vrijednosti tlaka. Maksimalni izlazni tlak za prikazani regulator *ITV3050-01F4N-Q*, je 9 bara, međutim prema industrijskim standardima koristit će se maksimalni tlak u sustavu iznosa 5 bara. Izlaz referentne vrijednosti tlaka spaja se na monostabilni razvodnik, koji regulira uvlačenje i izvlačenje klipa cilindra.

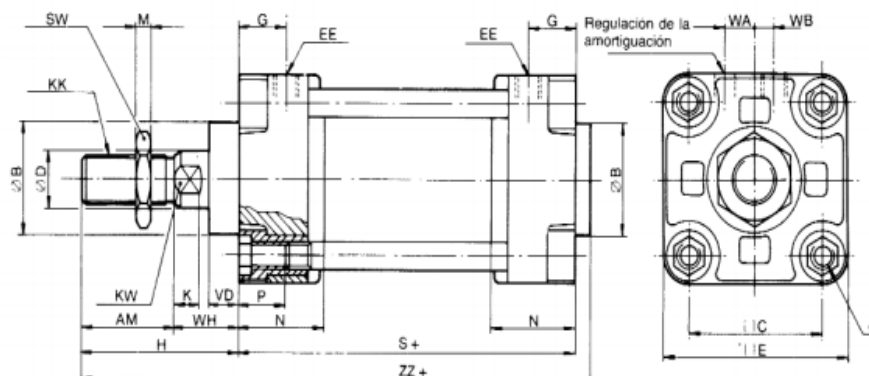


Slika 3.8. Pneumatska shema spajanja

Aktuator koji se koristi je dvoradni pneumatski cilindar što znači da se klip pomiče u oba smjera (izvlačenje-uvlačenje). Na cilindru su priključci za poliuretanske vodove kojima se doprema zrak pod tlakom. Posebna izvedba priključaka omogućuje nam ručno reguliranje brzine izvlačenja klipa. Klip na svom vrhu sadrži urezan navoj duljine  $L=20$  mm na koji se vijčano spaja gornji prihvat opruge.

Konstruktivske karakteristike pneumatskog cilindra, koje su najbitnije za prilagođavanje postolja preše dane su na slici 3.9.





Bore (mm)	AM	øB	C	ØD	E	EE	G	KK	H	J	K	KW	M	N	P	S	SW	VD	WA	WB	WH	ZZ
32	22	30	33	12	46	G1/8	13,5	M10 X 1.25	58	M6	6	10	5	23	11	74	17	10	7	6	36	136
40	24	32	44	16	60	G1/4	15,5	M12 X 1.25	64,5	M6	6	14	7	27	11	84	19	10	10	6	40,5	153,5
50	32	40	52	20	70	G1/4	17	M16 X 1.5	77	M8	7	18	8	30	14	90	24	10	11	10	45	173
63	32	40	64	20	85	G3/8	17	M16 X 1.5	80,5	M8	7	18	8	31	14	98	24	10	11	10	48,5	184,5
80	40	52	78	25	103	G3/8	22	M20 X 1.5	92	M10	11	22	10	37	19	116	30	14	11	16	52	215
100	40	52	92	30	116	G1/2	19,5	M20 X 1.5	97	M10	11	26	10	40	19	126	30	14	12	20	57	231
125	54	60	110	32	140	G1/2	25	M27 X 2	119	M12	15	27	13	45	42	160	41	26	20	15	65	287
160	72	65	140	40	180	G3/4	30	M36 X 2	152	M16	17	36	16	55	52	180	55	31	25	15	80	340

Slika 3.9. Presjek cilindra [8]

Bitno je napomenuti kako su dva glavna pneumatska elementa proporcionalni tlačni regulator i dvoradni pneumatski cilindar donirani od strane tvrtke SMC Industrijska automatika, zastupnika vodećeg svjetskog proizvođača pneumatskih elemenata, japanskog *SMC-a*.

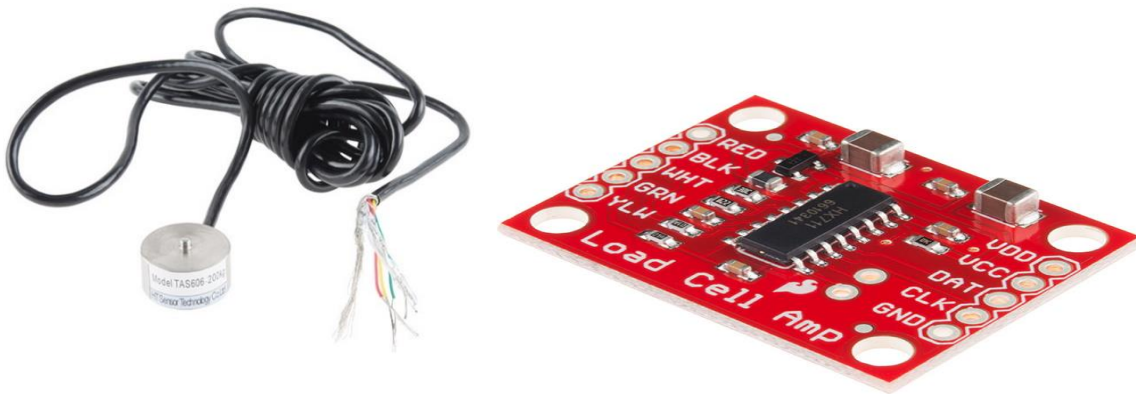
### 3.1.4. Upravljanje pneumatskom prešom



Slika 3.10. Arduino Uno mikrokontroler

Predviđeno upravljanje prešom je preko *Arduino-Uno* mikrokontrolera. Regulacijski krug objedinuju proporcionalni tlačni regulator, monostabilni razvodnik i senzor sile. Tlačni regulator je strujno upravljan što je danas sve češći slučaj u industriji radi manjeg šuma strujnog signala, te će za struju 4-20 mA koja će biti izlaz (output) mikrokontrolera propustiti tlak 1-9 bara. Ovdje je potrebno napomenuti kako je tlačni regulator jedini strujno upravljan, stoga će se izraditi elektronička pločica u svrhu konverzije naponskog signala u odgovarajući strujni signal.

Signal sa senzora sile je ulaz mikrokontrolera, a dozvoljena masa koju podnosi je 200 kg. S obzirom da mu je izlazni signal niske energetske razine potrebno je pojačalo kako bi se mjerni signal obradio u mikrokontroleru. U tu svrhu odabrano je pojačalo *HX711*, (slika 3.11.).



Slika 3.11. Senzor sile i pojačalo [9]

S obzirom da senzor sile daje naponski signal dovoljno je spojiti ga na pojačalo i napajati sa pretvaračem izmjeničnog napona iznosa 220 V na istosmjerni napon iznosa 24 V. Tlačni regulator i senzor sile daju analogne vrijednosti signala.

Karakteristike senzora su dane u tablici 1.

**Tablica 1. Karakteristike ugrađenog senzora sile**

Dozvoljeno opterećenje	Kg	200
Preporučeno opterećenje	Kg	150
Napon napajanja	Vdc	9-15
Pojačanje	mV/V	1.0-2.0
Ulazni otpor	$\Omega$	385
Izlazni otpor	$\Omega$	350
Točnost	Vdc	$\pm 0.5$
Temperaturni interval	$^{\circ}\text{C}$	-20- +65
Način spajanja	Kabel	4 PVC žice promjera 3 mm i duljine 2000 mm

Upravljanje se ostvaruje s monostabilnim razvodnikom koji je naponski upravljan, a za digitalni signal 0/1 otvara grane vodova kojim će se ostvarivati izvlačenje ili uvlačenje klipa cilindra.

**Slika 3.12. Monostabilni razvodnik [10]**

Nastavna maketa pneumatske preše koristit će se u procesu edukacije studenata. Tlačna opruga simulira protusilu koju bi davao predmet koji se preša. Osim toga, upravljanje realiziranog sustava obuhvaća širok spektar potrebnih znanja elektronike i mikroprocesorskog upravljanja, kao i konstruiranja cjelokupnog sustava. S obzirom da okuplja sva gore navedena znanja, ova nastavna maketa pneumatske preše izvrstan je put ka objedinjavanju teorije i prakse studija inženjerskih znanosti.

## **3.2. Mehatronički sustav kuglice na ploči**

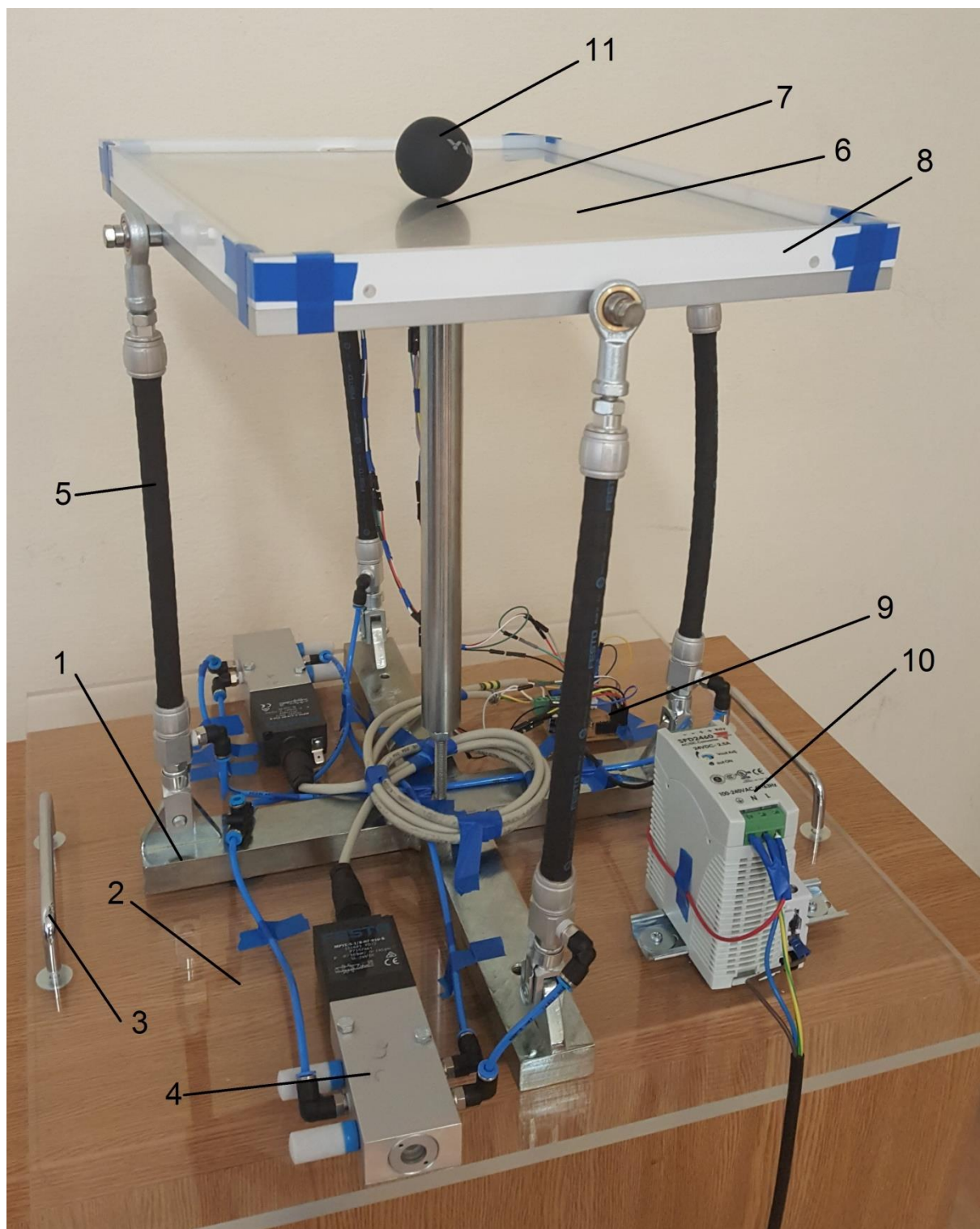
### **3.2.1. Značajke sustava kuglice na ploči**

Mehatronički sustav kuglice na ploči spada u skupinu podupravljenih sustava, što znači da dimenzija stupnjeva slobode gibanja sustava premašuje dimenziju upravljačkih varijabli. Takve sustave karakterizira izrazita nestabilnost. Sustav kuglice na ploči ima četiri stupnja slobode gibanja, a to su dvoosni zakret ploče i pomak kuglice, te dvije upravljačke varijable, odnosno momenti ostvareni s dva para pneumatskih mišića kojima se zakreće ploča. Takvi sustavi prikladni su i vrlo atraktivni za edukacijske svrhe radi objašnjenja teorije naprednih algoritama automatske regulacije i zbog praktične primjene različitih komponenti iz područja mehatronike, pneumatike, programiranja, senzorike.

### **3.2.2. Nastavna maketa**

Glavni dijelovi makete koji su označeni na slici 3.13 su sljedeći:

1. konstrukcija,
2. postolje od pleksiglasa,
3. ručke za postolje,
4. proporcionalni ventili,
5. pneumatskih mišići,
6. zaslon osjetljiv na dodir,
7. žiroskop,
8. ogradice,
9. tiskana pločica,
10. ispravljač i
11. kuglica.



Slika 3.13. Nastavna maketa sustava kuglice na ploči

Za nastavnu maketu najvažnije je odabrati odgovarajuće senzore kojima će se točno mjeriti stupnjevi slobode gibanja sustava. Bez dobrog mjerenja je nemoguće ostvariti dobru

regulaciju sustava iako imamo dobre regulacijske algoritme, ali uz dobro mjerenje i nešto slabije regulacijske algoritme još uvijek se može ostvariti dobra regulacija sustava. Na nastavnoj maketi, od senzora, ugrađen je žiroskop koji mjeri dvoosni kut zakreta ploče i otpornički zaslon osjetljiv na dodir koji mjeri poziciju kuglice (slika 3.14.).



**Slika 3.14. Zaslon osjetljiv na dodir i žiroskop**

Za upravljanje stlačenim zrakom koriste se proporcionalni ventili (slika 3.15), upravljani naponskim signalom, čija je izlazna vrijednost protoka zraka proporcionalna ulaznom naponskom signalu. Prednost takvih ventila je što imaju mogućnost kontroliranja brzine toka zraka i mogu usmjeravati tok zraka u dvije komore aktuatora[13].



**Slika 3.15. Proporcionalni ventil [14]**



Na nastavnu maketu ugrađena su četiri umjetna pneumatska mišića. Umjetni pneumatski mišići (slika 3.16), su aktuatori, koji proizvode linearno gibanje u aksijalnom smjeru i kontrakcijsko u radijalnom. Prednost takvih pneumatskih mišića je u tome što su malih masa i malih dimenzija, imaju povoljan odnos mase i sile koju proizvode, lako se održavaju i imaju dugi vijek trajanja [15]. S obzirom da nemaju pokretnih dijelova koji se troše, mogu ostvariti veliki broj radnih ciklusa. Imaju vrlo jednostavan način rada te se mogu koristiti u prijenosu radnih predmeta s jednog mjesta na drugo upuhivanjem i ispuhivanjem zraka. Mogu se koristiti u prljavim i prašnjavim uvjetima jer su hermetički zatvoreni [16]. Jedan proporcionalni ventil upravlja sa dva nasuprotna umjetna pneumatska mišića. Kad se u jedan mišić upuhuje zrak, on se skraćuje, a kad se iz drugog mišića ispuhuje zrak on se izdužuje i obrnuto.



**Slika 3.16. Umjetni pneumatski mišić u kontrahiranom (gore) i opuštenom stanju (dolje) [17]**

Za upravljanje proporcionalnim ventilima i obradu mjernih signala napravljena je tiskana pločica (slika 3.17), koja na sebi ima pojačanje za proporcionalne ventile od 0 do 10 V i mikrokontroler za programiranje sustava kuglice na ploči. Također sadrži i napajnje proporcionalnih ventila od 24 V. Mikrokontroler je malo računalo u jednom čipu. Sadrži jedan ili više mikroprocesora, *flash* memoriju, RAM memoriju i programabilne izlaze i ulaze. Sadrže i analogno/digitalne pretvornike koji pretvaraju analogni signal u digitalni, jer je signal

sa senzora analogan, a mikroprocesori mogu obrađivati samo digitalne signale. Programiranje mikrokontrolera se vrši preko FTDI programatora.

Za napajanje sustava korišten je ispravljač koji izmjenični napon od 230 V pretvara u istosmjerni napon od 24 V.



Slika 3.17. Tiskana pločica za upravljanje proporcionalnim pneumatskim ventilima

### 3.2.3. Matematički model sustava kuglice na ploči

Dinamički sustavi mogu se modelirati na različite načine tj. korištenjem standardnih Newton-ovih jednadžbi gibanja za modeliranje mehaničkih sustava, zatim korištenjem Ohm-ovih i Kirchhoff-ovih zakona za modeliranje električnih sustava i sl. Moderni pristup modeliranju dinamičkih sustava zasniva se na energetskom pristupu sustavu odnosno korištenjem Euler-Lagrange-ovih jednadžbi, koje će biti implementirane na zadani sustav kuglice na ploči.

#### 3.2.3.1. Euler-Lagrange-ova metoda

Euler-Lagrange-ova metoda primjenjiva je za modeliranje i mehaničkih i električnih sustava. U mehaničkim sustavima se pojavljuju kinetička energija dijelova sustava u gibanju, zatim potencijalna energija dijelova sustava zbog razlike u relativnoj visini s obzirom na nepomični koordinatni sustav promatranog mehaničkog sustava te disipacijska energija, koja nastaje



zbog disipacije topline uzrokovana trenjem dijelova u sustavu. Ekvivalent kinetičkoj energiji mehaničkih sustava, u električnim sustavima, jest indukcijska energija pohranjena u zavojnicama. Isto tako potencijalna energija mehaničkog sustava je ekvivalent kapacitivnoj energiji pohranjenoj u kondenzatorima u električnim sustavima, dok je disipacijska energija ekvivalenta disipiranoj toplini nastaloj zbog zagrijavanja vodiča prilikom prolaska električne struje.

Euler-Lagrange-ova jednadžba definirana je sljedećim izrazom [9]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K_j}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial K_j}{\partial q_i} \right) + \left( \frac{\partial P_j}{\partial q_i} \right) = T_{ij}, \quad (3.3)$$

gdje je  $q_i$   $i$ -ta upravljana koordinata,  $\dot{q}_i$  brzina  $i$ -te upravljane koordinate,  $K_j$  kinetička energija  $j$ -te mase,  $P_j$  potencijalna energija  $j$ -te mase te  $T_{ij}$  upravljačka sila/moment u  $i$ -toj upravljanoj koordinati za pokretanje  $j$ -te mase. Ukupna sila odnosno moment u upravljanoj koordinati iznosi prema izrazu kako slijedi:

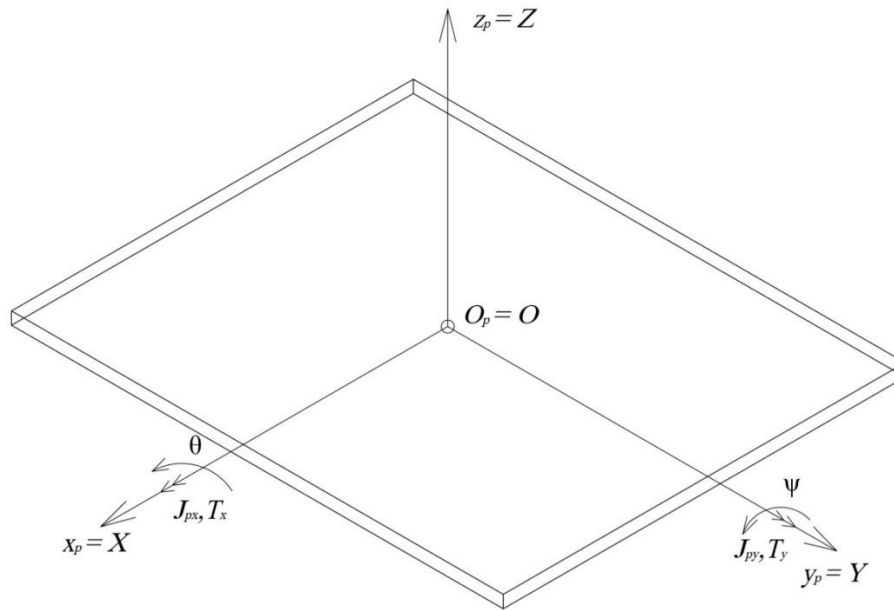
$$T_i = \sum_{j=1}^N T_{ij}, \quad (3.4)$$

gdje je  $N$  broj masa koje sudjeluju u gibanju.

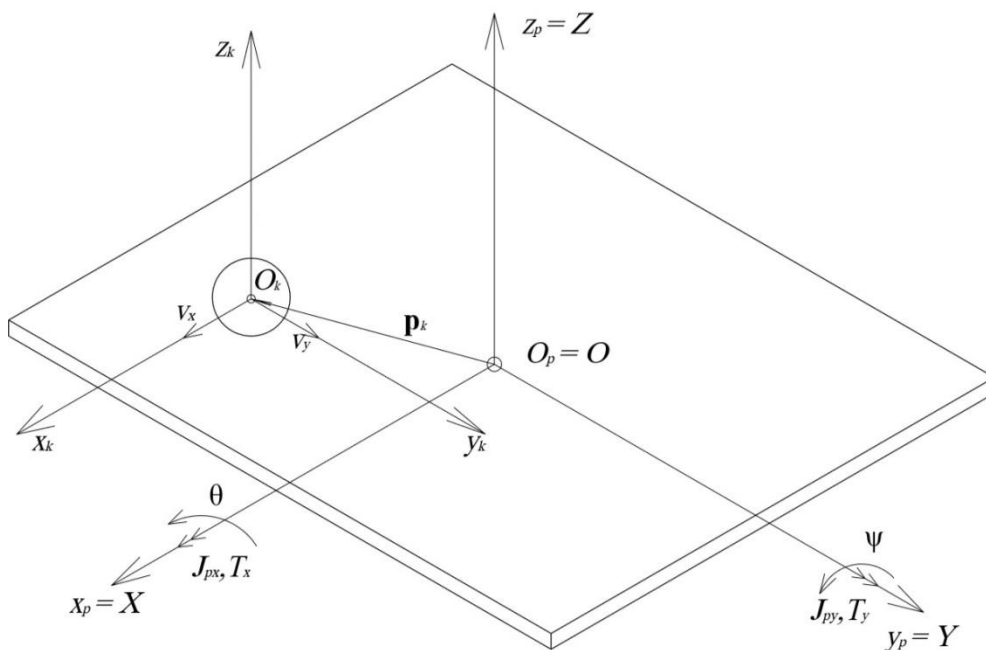
Prednosti korištenja navedene metode su to što se dobivaju skalarnе jednadžbe umjesto Newton-ovih vektorskih jednadžbi. Problem pronalaska akceleracije dijelova sustava je automatski riješen korištenjem navedene metode stoga je jako pogodna za modeliranje mehatroničkih sustava (često primjenjivana u robotici kao primjer vrlo složenih mehatroničkih sustava [18]).

### 3.2.3.2. Dinamički model sustava

Dinamički model sustava izveden je tako da je sustav kuglice na ploči podijeljen u dva podsustava odnosno na podsustav ploče i podsustav kuglice, na kojima se odvojeno promatrala kinetička i potencijalna energija svakog od podsustava. Na sljedećim slikama su prikazani svaki od pojedinih podsustava.



Slika 3.18. Podsustav ploče



Slika 3.19. Podsustav kuglice

Promatrajući svaku od energija podsustava i njihovom superpozicijom dobivaju se izrazi za ukupnu energiju sustava dana izrazima kako slijedi:

$$K = \frac{1}{2} \left( m_k \left( \dot{x}^2 - 2r\dot{x}\dot{\psi} + \dot{\psi}^2 (r^2 + x^2) + \dot{y}^2 - 2r\dot{y}\dot{\theta} + \dot{\theta}^2 (r^2 + y^2) \right) + (J_k + J_{px}) \dot{\theta}^2 + (J_k + J_{py}) \dot{\psi}^2 \right), \quad (3.5)$$

$$P = m_k g (x_k \sin(\psi) + y_k \sin(\theta) + r(\cos(\psi) + \cos(\theta))).$$

Upravljanje koordinate sustava i upravljački momenti, potrebni za implementaciju Euler-Lagrange-ove jednadžbe dani su izrazom kako slijedi:

$$\begin{aligned} q_1 &= x, \\ q_2 &= y, \\ q_3 &= \theta, \\ q_4 &= \psi, \\ T_1 &= 0, \\ T_2 &= 0, \\ T_3 &= T_x, \\ T_4 &= T_y. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (3.5) i (3.6) u Euler-Lagrange-ovu jednadžbu danu izrazom (3.3) slijedi ukupni dinamički model sustava:

$$\begin{aligned} \left( m_k + \frac{J_k}{r^2} \right) \ddot{q}_1 - m_k r \ddot{q}_4 - m_k q_1 \dot{q}_4^2 + m_k g \sin(q_4) &= 0, \\ \left( m_k + \frac{J_k}{r^2} \right) \ddot{q}_2 - m_k r \ddot{q}_3 - m_k q_2 \dot{q}_3^2 + m_k g \sin(q_3) &= 0, \\ \left( m_k (r^2 + q_2^2) + J_{px} \right) \ddot{q}_3 - m_k r \ddot{q}_2 + 2m_k q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + m_k g (q_2 \cos(q_3) - r \sin(q_3)) &= T_x, \\ \left( m_k (r^2 + q_1^2) + J_{py} \right) \ddot{q}_4 - m_k r \ddot{q}_1 + 2m_k q_1 \dot{q}_1 \dot{q}_4 + m_k g (q_1 \cos(q_4) - r \sin(q_4)) &= T_y. \end{aligned} \quad (3.7)$$

U svrhu projektiranja regulatora za zadani sustav, nelinearni dinamički model sustava je lineariziran prema određenim pretpostavkama. Linearizirani model sustava dan je izrazom kako slijedi:

$$\begin{aligned}\left(m_k + \frac{J_k}{r^2}\right)\ddot{q}_1 - m_k r \ddot{q}_4 + m_k g q_4 &= 0, \\ \left(m_k + \frac{J_k}{r^2}\right)\ddot{q}_2 - m_k r \ddot{q}_3 + m_k g q_3 &= 0, \\ \left(m_k r^2 + J_{px}\right)\ddot{q}_3 - m_k r \ddot{q}_2 + m_k g (q_2 - r q_3) &= T_x, \\ \left(m_k r^2 + J_{py}\right)\ddot{q}_4 - m_k r \ddot{q}_1 + m_k g (q_1 - r q_4) &= T_y.\end{aligned}\tag{3.8}$$

### 3.2.4. Prostor stanja i sinteza regulatora

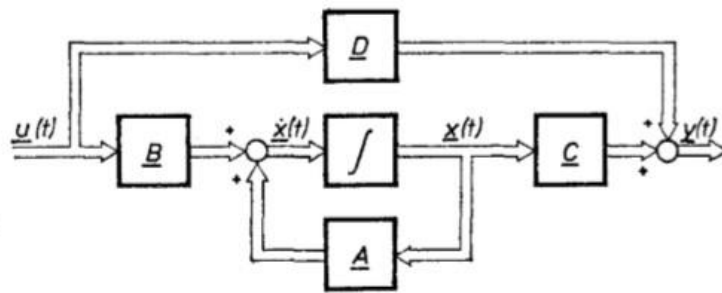
Kako je prethodno navedeno u svrhu projektiranja regulatora, nelinearni dinamički model sustava je lineariziran. Linearizirani model se zatim prikazuje u tzv. prostoru stanja koji je pogodan za projektiranje regulatora. U ovom potpoglavlju bit će dan kratak opis metode prostora stanja, zatim opis LQR (eng. *linear-quadratic regulator*) regulatora te sama sinteza regulatora i odziv sustava u zatvorenom regulacijskom krugu.

#### 3.2.4.1. Prostor stanja

Dinamička analiza regulacijskih sustava bila je u prvotnoj fazi ograničena na vremensko područje i to na klasično rješenje diferencijalne jednačbe, a zatim i na metodu vremenskog odziva pomoću prijelazne funkcije. Međutim taj pristup postavlja ograničenja daljnjem teorijskom i praktičkom razvoju automatske regulacije. U vezi sa sve većom složenošću moderne tehnologije i upravljanja, u prvi plan dolaze tzv. multivarijabilni sustavi s mnogo povezanih ulaznih i izlaznih veličina. Prostorom stanja je na zadovoljavajući način riješeno i pitanje optimalnog upravljanja, gdje je uvijek prisutno izvjesno iskustveno prilagođavanje [19]. Sustavi u prostoru stanja prikazuju se u dvije osnovne matrične jednačbe odnosno jednačbom stanja i jednačbom izlaza. Navedene matrične jednačbe dane su izrazom kako slijedi [20]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t), \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t),\end{aligned}\quad (3.9)$$

gdje je pri tome  $\mathbf{X}(t)$  vektor varijabli stanja,  $\mathbf{U}(t)$  vektor ulaza u sustav,  $\dot{\mathbf{X}}(t)$  derivacija vektora varijabli stanja  $\mathbf{X}(t)$ ,  $\mathbf{Y}(t)$  vektor izlaza sustava,  $\mathbf{A}(n \times n)$  matrica koeficijenata sustava,  $\mathbf{B}(n \times m)$  matrica ulaza sustava,  $\mathbf{C}(p \times n)$  matrica izlaza sustava,  $\mathbf{D}(p \times m)$  matrica prijenosa sustava,  $n$  broj varijabli stanja odnosno red sustava,  $m$  broj ulaznih varijabli i  $p$  broj izlaznih varijabli iz sustava. Slika 3.20 prikazuje prostor stanja u blokovskom dijagramu.



Slika 3.20. Blokovski dijagram prostora stanja [19]

Raspregnuti model sustava dan je sljedećim izrazom kako slijedi:

$$\begin{aligned}\ddot{q}_1 &= \frac{5}{7} \frac{k_1}{k_4} r T_y - \frac{5}{7} \frac{k_1 k_3}{k_4} r q_1 + \frac{5}{7} \left( \frac{k_1 k_3}{k_4} r^2 - \frac{1}{k_4} g \right) q_4, \\ \ddot{q}_2 &= \frac{5}{7} \frac{k_1}{k_5} r T_x - \frac{5}{7} \frac{k_2 k_3}{k_5} r q_2 + \frac{5}{7} \left( \frac{k_2 k_3}{k_5} r^2 - \frac{1}{k_5} g \right) q_3, \\ \ddot{q}_3 &= \frac{k_2}{k_5} T_x - \frac{k_2 k_3}{k_5} q_2 + \frac{2}{7} \frac{k_2 k_3}{k_5} r q_3, \\ \ddot{q}_4 &= \frac{k_1}{k_4} T_y - \frac{k_1 k_3}{k_4} q_1 + \frac{2}{7} \frac{k_1 k_3}{k_4} r q_1,\end{aligned}\quad (3.10)$$

gdje su pomoćne konstante  $k_1, k_2, k_3, k_4$  i  $k_5$  dane izrazom kako slijedi:

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{1}{J_{py} + m_k r^2}, \\
k_2 &= \frac{1}{J_{px} + m_k r^2}, \\
k_3 &= m_k g, \\
k_4 &= 1 - \frac{5}{7} k_1 m_k r^2, \\
k_5 &= 1 - \frac{5}{7} k_2 m_k r^2.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Nakon raspredanja sustava po varijablama stanja, definira se vektor varijabli stanja  $\mathbf{X}(t)$ .

Komponente vektora varijabli stanja dane su sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned}
x_1 &= q_1, \\
\dot{x}_1 &= \dot{q}_1, \\
x_2 &= q_2, \\
\dot{x}_2 &= \dot{q}_2, \\
x_3 &= q_3, \\
\dot{x}_3 &= \dot{q}_3, \\
x_4 &= q_4, \\
\dot{x}_4 &= \dot{q}_4,
\end{aligned} \tag{3.12}$$

odnosno vektor varijabli stanja  $\mathbf{X}(t)$  kako slijedi:

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \\ q_3 \\ \dot{q}_3 \\ q_4 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix}. \tag{3.13}$$

Jednadžbe su dane za ukupni linearizirani matematički model prema izrazu (3.8), a prikazuju se u prostoru stanja prema izrazu:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \ddot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \ddot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \ddot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \\ q_3 \\ \dot{q}_3 \\ q_4 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}, \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C} \begin{bmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \\ q_3 \\ \dot{q}_3 \\ q_4 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

gdje su matrice  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$  :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 & A_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{63} & 0 & A_{65} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{81} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{87} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{22} \\ 0 & 0 \\ B_{41} & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{61} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_{82} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

gdje su pomoćni koeficijenti iz prethodnog izraza:

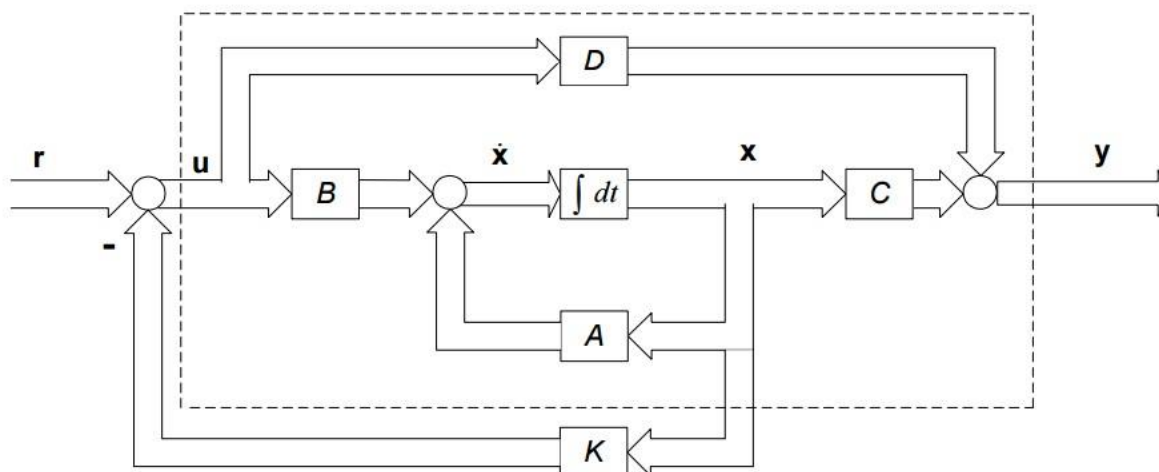
$$\begin{aligned} A_{21} &= -\frac{5 k_1 k_3}{7 k_4} r, A_{27} = \frac{5}{7} \left( \frac{k_1 k_3}{k_4} r^2 - \frac{1}{k_4} g \right), A_{43} = -\frac{5 k_2 k_3}{7 k_5} r, A_{45} = \frac{5}{7} \left( \frac{k_2 k_3}{k_5} r^2 - \frac{1}{k_5} g \right) \\ A_{63} &= -\frac{k_2 k_3}{k_5}, A_{65} = \frac{2 k_2 k_3}{7 k_5} r, A_{81} = -\frac{k_1 k_3}{k_4}, A_{87} = \frac{2 k_1 k_3}{7 k_4} r, \\ B_{22} &= \frac{5 k_1}{7 k_4} r, B_{41} = \frac{5 k_2}{7 k_5} r, B_{61} = \frac{k_2}{k_5}, B_{82} = \frac{k_1}{k_4}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

te matrice  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{D}$  :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

### 3.2.4.2 Sinteza regulatora

Odabrani regulator za zadani sustav je LQR regulator odnosno regulator po varijablama stanja [20]. Na slici 3.21. prikazan je blokovski dijagram regulatora po varijablama stanja.



Slika 3.21. Blokovski dijagram regulatora po varijablama stanja [15]

Kao što je prikazano na slici sustavu opisanom u prostoru stanja uvodi se povratna veza po varijablama stanja. Tom povratnom vezom definira se vektor upravljanja  $\mathbf{u}(t)$  prema izrazu:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad (3.18)$$

gdje je  $\mathbf{r}(t)$  vektor vođenja, a  $\mathbf{K}$  matrica pojačanja. Treba pronaći takav vektor upravljanja koji minimizira funkcional odnosno indeks performanse, dan sljedećim izrazom:

$$I = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt. \quad (3.19)$$

Matrice  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  težinske su matrice, pri čemu se matricom  $\mathbf{Q}$  utječe na prijelazni proces vektora stanja, a preko matrice  $\mathbf{R}$  na iznos energije upravljanja. Stoga se izborom elemenata



matrica  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  može utjecati na dinamičko ponašanje sustava u uvjetima zatvorenog regulacijskog kruga.

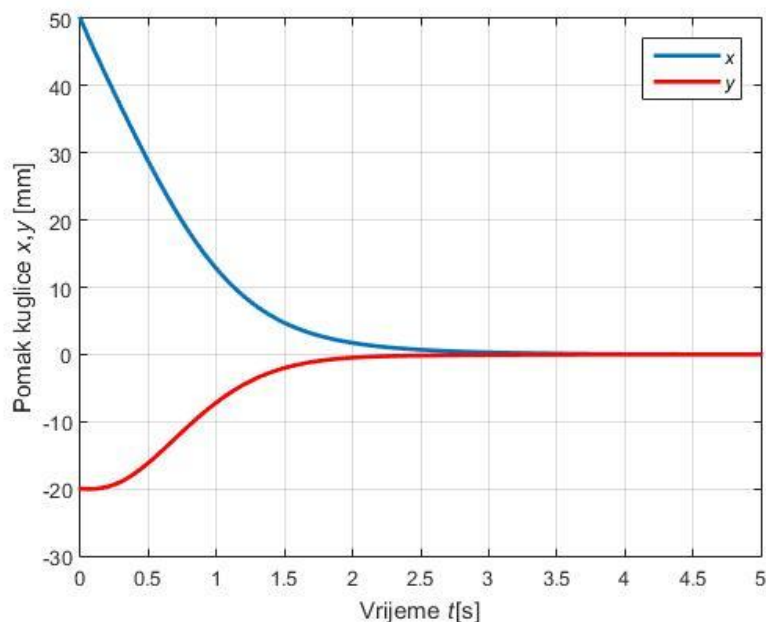
Projektiranje optimalnog regulatora je iterativan postupak koji se ponavlja dok se ne zadovolje određeni zahtjevi za ponašanje sustava tj. željena brzina odziva, točnost i sl.

Nakon implementiranih matrica  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  na linearizirani model, u MATLAB-u naredbom  $lqr()$  dobiva se matrica pojačanja  $\mathbf{K}$  kako slijedi:

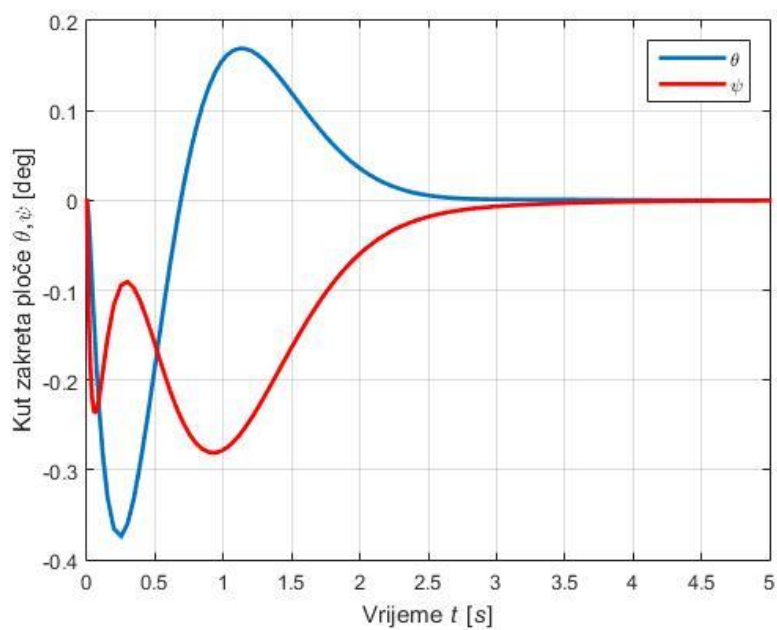
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -7,5005 & -6,3412 & 14,5417 & 2,2804 & 0 & 0 \\ -6,4629 & -6,0326 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14,8281 & 2,5295 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

### 3.2.5. Odziv sustava u zatvorenom regulacijskom krugu

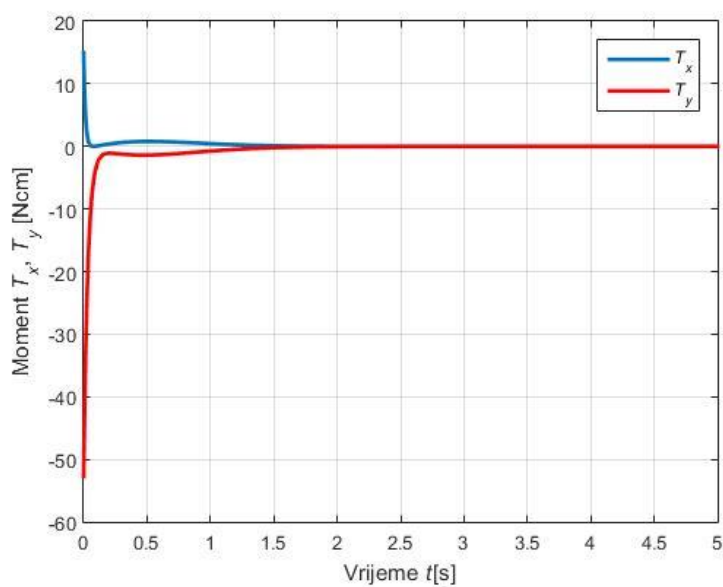
Implementacijom prostora stanja i matrice pojačanja u MATLAB-u dobiva se odziv sustava u zatvorenom regulacijskom krugu. Sljedećim slikama prikazan je odziv sustava kako slijedi:



Slika 3.22. Odziv pozicije kuglice u zatvorenom krugu



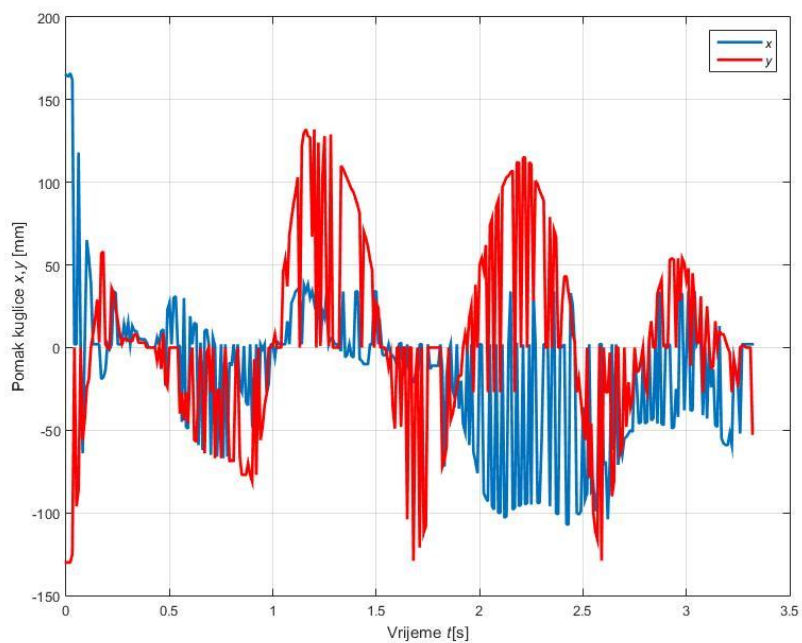
Slika 3.23. Odziv kuta zakreta ploče u zatvorenom krugu



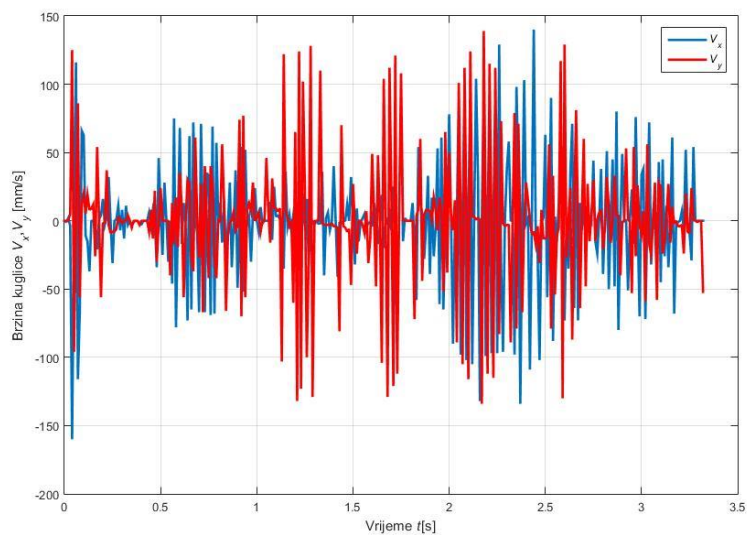
Slika 3.24. Odziv upravljačkog momenta na ploči

### 3.2.6. Odzivi realnog fizikalnog sustava kuglice na ploči

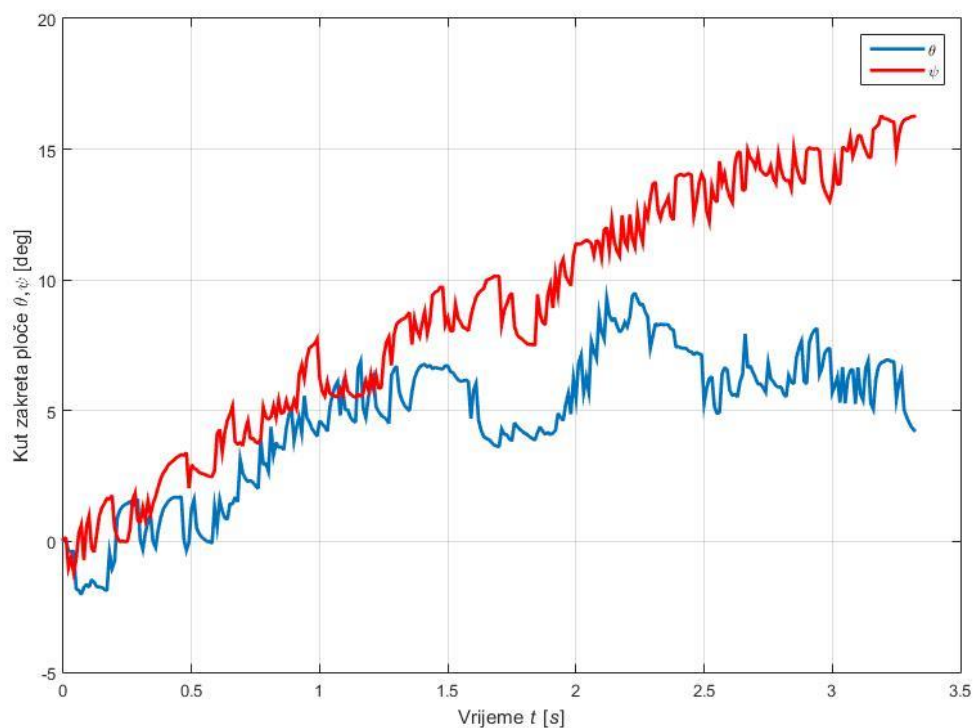
Na sljedećim slikama bit će prikazani odzivi realnog fizikalnog sustava.



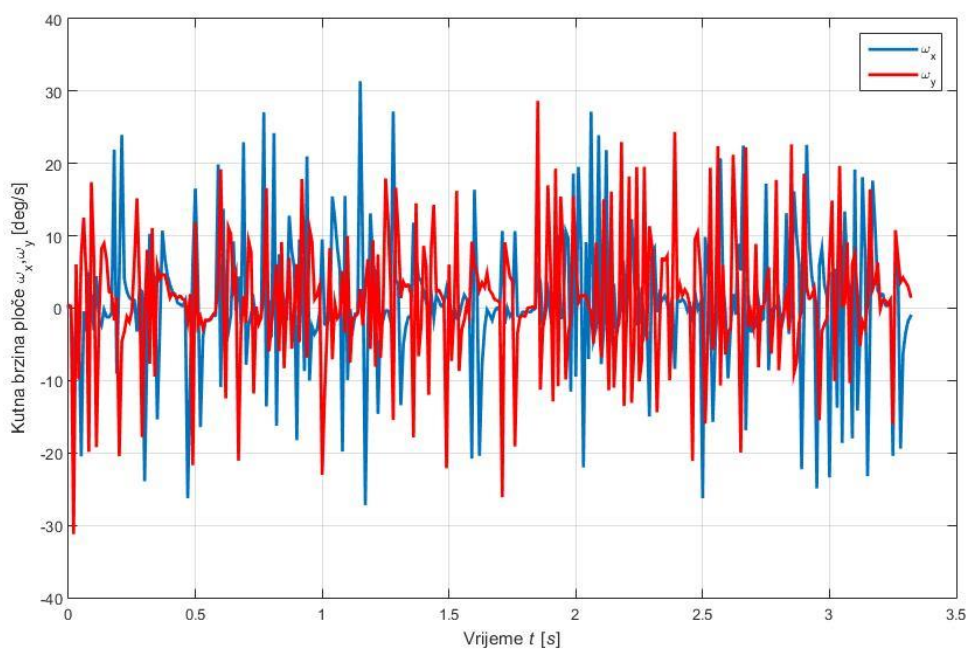
Slika 3.25. Odziv pozicije kuglice na nastavnoj maketi



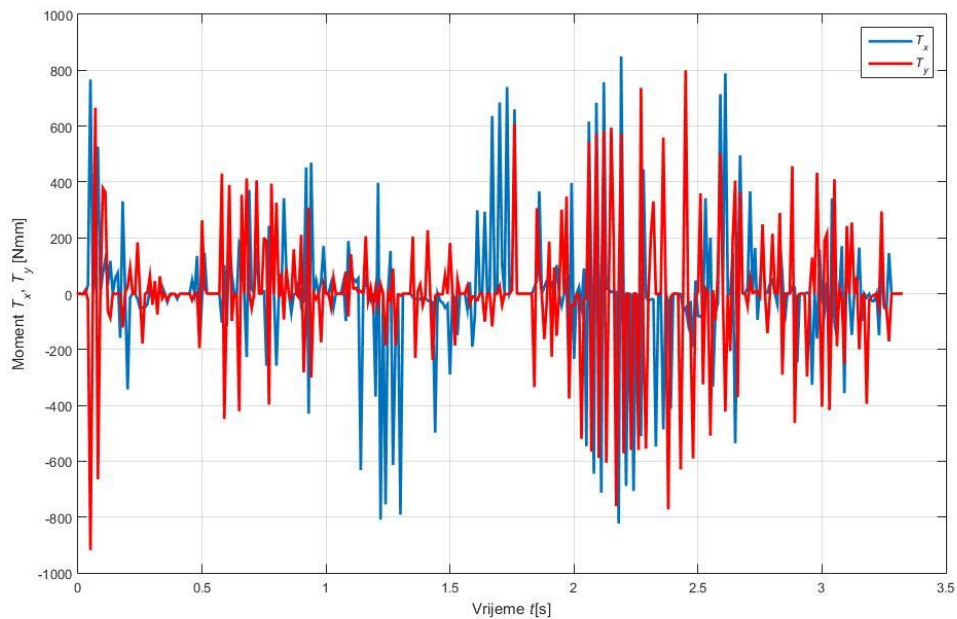
Slika 3.26. Odziv brzine kuglice na nastavnoj maketi



Slika 3.27. Odziv kuta zakreta ploče na nastavnoj maketi



Slika 3.28. Odziv kutne brzine ploče na nastavnoj maketi



**Slika 3.29. Odziv upravljačkog momenta na nastavnoj maketi**

Kao što se vidi na slikama, odziv trenutnog realnog sustava je nestabilan. Dobiveni signali sadrže jako puno šuma, koji nastaje zbog elektromagnetskih smetnji u okolišu rada senzora. Zbog nastalih velikih šumova u mjernim signalima na sustavu, sustavom se trenutno ne može stabilno upravljati. Razlog tome je što se šum mjernog signala preslikava na upravljački signal momenta, koji upravlja cijelim sustavom kuglice na ploči.

Rješenje tog problema leži u kvalitetnom filtriranju mjernih signala i oklopljivanju kabela kroz koji prolaze mjerni signali. Sljedeći korak u realizaciji sustava jest upravo rješenje problema šumova u mjernim signalima na sustavu.

### **3.3. Mehatronički sustav sinkroniziranog djelovanja pneumatskih cilindara**

#### **3.3.1. Pneumatski cilindri upravljani matrix ventilom**

Mehatronički sustav sinkroniziranog djelovanja pneumatskih ventila pokazuje mogućnosti upravljanja sa više pneumatskih aktuatora u isto vrijeme, od kojih svaki obavlja karakterističnu zadaću. Da bi se rad sustava demonstrirao zamišljena je i realizirana konstrukcija makete pomoću koje se sinkronizirano linearno gibanje pneumatskih cilindara transformira u rotacijsko. Rotacijsko gibanje je nezaobilazno rješenje od početka civilizacije i nalazi svrhu u raznim strojevima i uređajima. U maketi se koriste pneumatski cilindri upravljani Matrix ventilom te funkcionalni dijelovi klipno koljениčastog mehanizma izrađeni aditivnom tehnologijom 3D ispisa. Klipno-koljениčasti mehanizam je vrlo poznat i tehnički razrađen koncept koji se danas koristi kao osnova motora s unutrašnjim izgaranjem, te u parnim strojevima i pumpama. Inovativna tehnologija korištena u konstrukciji brzih i kompaktnih Matrix ventila omogućuje sinkronizirano upravljanje gibanjem više aktuatora istovremeno, uz ostvarenje izuzetno brzih odziva ventila na električni upravljački signal. Upotreba minijaturnih pneumatskih cilindara u kombinaciji s brzim Matrix ventilima omogućuje ostvarivanje automatiziranih procesa s izuzetno brzom dinamikom i niskom potrošnjom energije. Kao pomoć pri upravljanju izradit će se tiskana pločica te će se upravljački signali slati iz kontrolera na ventil.

### 3.3.2. Tehnički opis sustava

#### 3.3.2.1. Minijaturni pneumatski cilindri

Najčešći aktuatorski element u pneumatskim sustavima je pneumatski cilindar. Danas na tržištu postoji veliki broj različitih cilindara ovisno o namjeni, uvjetima rada te dimenzijama. Služe za pretvaranje energije stlačenog zraka u linearno gibanje. Radi njihove jednostavnosti i pouzdanosti koriste se kao izvršni elementi u industrijskim postrojenjima i robotici. Ukoliko zahtjev za tlakom ne prelazi 10 bara ekološki aspekt zraka kao medija spremnika energije također pridonosi velikoj upotrebi pneumatskih aktuatora. Posebno u uvjetima gdje se žele izbjeći problemi s dovodom ulja u hidrauličkim sustavima.

U maketi se koriste minijaturni pneumatski cilindri oznake SMC CDQSKB16-30DM koji su idealni za primjenu u sustavima gdje postoji zahtjev za uštedom prostora. Kompaktan dizajn i šesterokutna klipnjača omogućuju male i precizne radnje bez kutnih pomaka.

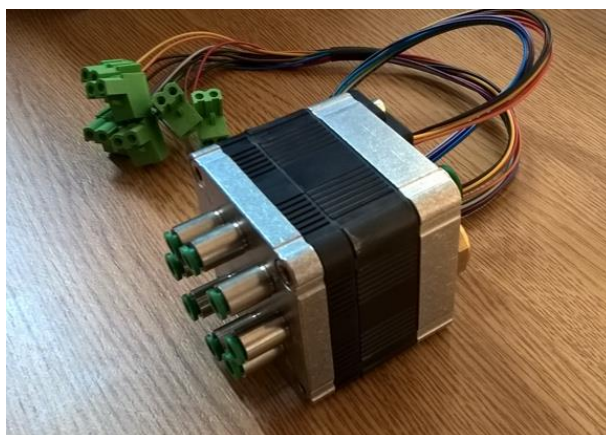


Slika 3.30. Minijaturni pneumatski cilindri SMC CDQSKB16-30DM

### 3.3.2.2. Razvodni ventil

Ventili su elementi pneumatskog sustava koji upravljaju dovodom zraka u aktuatore. Pneumatski elektromagnetski ventili se mogu podijeliti u dvije kategorije: dvopoložajni (on/off) ventili i proporcionalni ventili. Dvopoložajni ventili kombiniraju otvoreno i zatvoreno stanje s električnim upravljanjem. Proporcionalni ventili kombiniraju svoju poziciju između otvorenog i zatvorenog stanja sa strujnim upravljanjem. Princip rada dvopoložajnih ventila se temelji na elektromagnetskom pomicanju središnje jezgre. Elektromagnet se aktivira u slučaju spajanja na strujni izvor. Evolucija tehnologije vodi do razvoja novih tehnika upravljanja protokom, koje omogućavaju upotrebu digitalnih komponenti umjesto proporcionalnih. Te tehnike su: PWM (Pulse Width Modulation), PFM (Pulse Frequency Modulation), PNM (Pulse Number Modulation) i PCM (Pulse Code Modulation)[21].

U maketi će se koristiti dvopoložajni BIBUS Matrix 3/2 ventil oznake BX 758.8E2C324 s jednim ulazom, te osam digitalno upravljanih izlaza. Kompaktan dizajn omogućuje kratko vrijeme odziva, nisku osjetljivost na vibracije, veliku preciznost i dugi radni vijek. Primjena Matrix BX 758.8E2C324 ventila je moguća u uređajima za kontrolu tlaka i protoka, sustavima s naglaskom na pozicioniranje, robotskoj i industrijskoj automatizaciji itd.

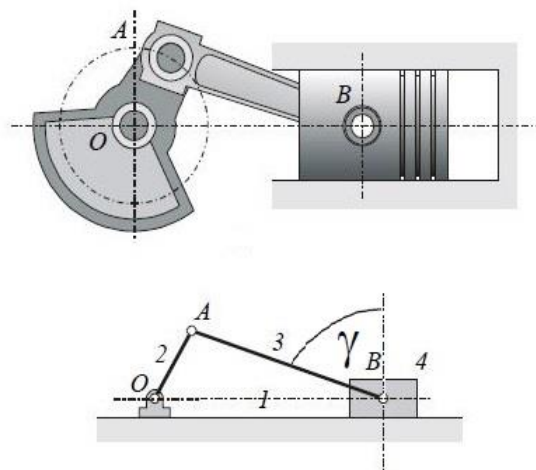


Slika 3.31. Brzi Matrix ventil oznake BX 758.8E2C324



### 3.3.2.3. Klipno – koljeničasti mehanizam

Klipno – koljeničasti mehanizam se koristi za transformaciju linearnog gibanja u rotacijsko i obrnuto. Sastoji se od translirajuće mase koja je sa tri rotacijska zgloba povezana sa centrom rotacije. Kinematički uvjeti mehanizma rezultiraju jednim stupnjem slobode gibanja mehanizma. Radi povoljnijeg prijenosa sila s klizača na rotacijski član poželjno je da je kut prijenosa klipno-koljeničastog mehanizma približno jednak 90 stupnjeva.



Slika 3.32. Kinematička shema mehanizma [22]

### 3.3.2.4. Tiskana pločica

Kako bi se pričvrstile elektroničke komponente na jedno mjesto te dobio robusni elektronički spoj konstruirana je i izrađena tiskana pločica. Pločica je projektirana u KiCAD softwareu. Debljina vodova se određuje prema planiranim iznosima struje koja prolazi kroz pločicu.

Za ispravan rad makete na pločicu idu sljedeće komponente:

1. Priključak za odgovarajuće napajanje budući da Matrix ventil zahtijeva istosmjerni napon iznosa 24 V za ispravan rad

2. Dvanaest izlaza za žice iz pneumatskog ventila prema shemi u specifikacijama Matrix ventila
3. Ulazi iz kojih pločica dobiva signale za upravljanje Matrix ventilom. Na ulaze se mogu priključiti razni uređaji, pod uvjetom da mogu generirati tražene digitalne signale u skladu sa zahtjevima gibanja cilindra (Raspberry PI, Arduino..)
4. Darlingtonov tranzistorski red oznake ULN2803A koji služi kao sklopka
5. Stabilizator napona oznake LM7810 koji pretvara istosmjerni napon iznosa 24V na 10V za napajanje
6. Priključak za Hallov bipolarni senzor oznake SS411A na temelju kojeg se odlučuje o kretanju cilindra i mjeri brzine vrtnje vratila

### **3.3.2.5. Mikokontroler**

Kao upravljačka jedinica može se koristiti niz uređaja koji su sposobni na ulazu tiskane pločice generirati upravljačke, tj. digitalne signale. Radi pristupačnosti, jednostavnosti i mogućnosti ostvarivanja automatiziranih procesa koristit će se mikokontroler Arduino Nano. Mikokontroler je elektronički uređaj koji sadrži sve elemente potrebne za samostalan rad (mikroprocesor, RAM i ROM memoriju, ulaze/izlaze, oscilatorski krug sa kristalom, regulator napona, USB ili serijsku komunikaciju) te se može smatrati umanjenom izvedbom modernog računala. Upravo se zbog malih dimenzija i dobre pouzdanosti mikokontroleri koriste u kućanskim aparatima, električnim alatima, automobilima, uređajima za daljinsko upravljanje, industrijskim postojenjima itd.

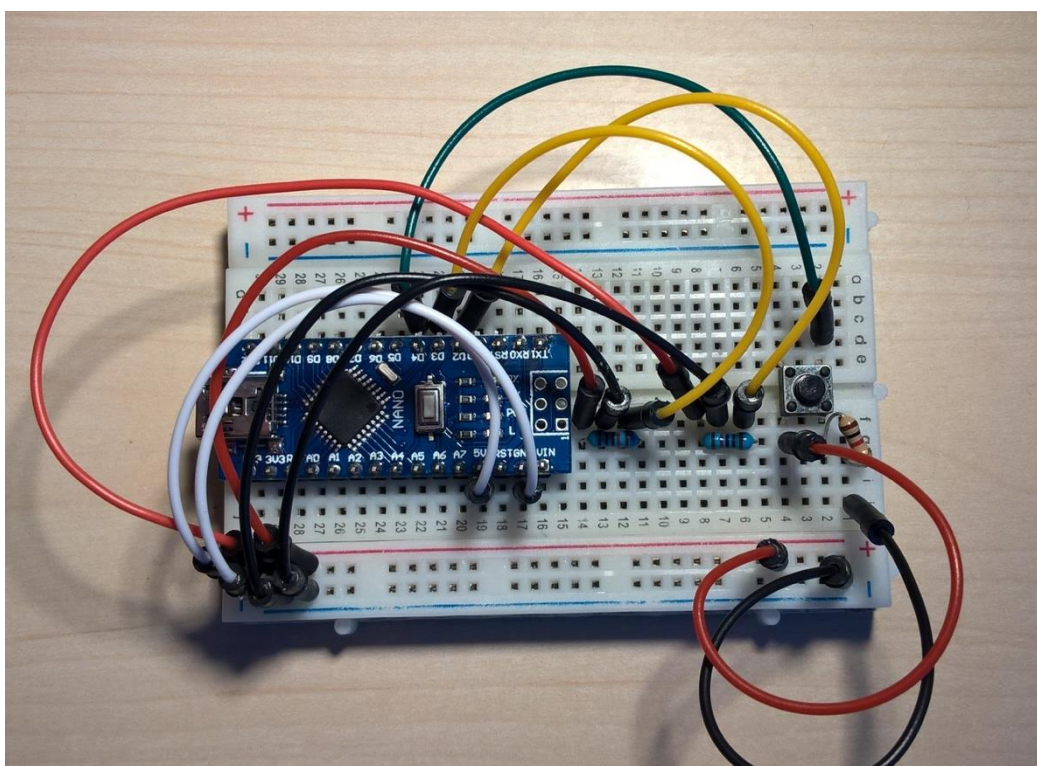
Arduino Nano je mikokontroler baziran na Atmega328 procesoru tvrtke Atmel.

Karakteristike mikokontrolera su:

1. USB V2.0 komunikacija
2. Radni napon 5 V

3. Ulazni napon 7-12 V
4. Maksimalna struja po I/O pinu 40mA
5. SRAM memorija 2KB, EEPROM memorija 1KB, Flash memorija 32 KB

Za programiranje mikrokontrolera koristi se Arduino softverski alat koje je baziran na C++ programskom jeziku. Programski kod pisan je prema priključenim ulazima iz senzora i sigurnosnog tipkala za pokretanje programa. Kod sa algoritmom pokretanja slijedi u nastavku poglavlja.



**Slika 3.33. Mikrokontroler na eksperimentalnoj ploči za elektroniku**

```
//PROGRAM ZA UPRAVLJANJE MATRIX VENTILOM
```

```
int one=5, two=6, three=7, four=8, five=9, six=10, seven=11, eight=12; //cilindri
```

```
int hallPin1 = 2, hallPin2 = 3; //ulazi za hallov senzor
```

```
int buttonPin = 4; //ulaz za tipku namijenjenu za kontrolirano pokretanje mehanizma
```

```
int buttonState = 0, hall ;
```

```
//setup() funkcija se poziva na pocetku programa
```

```
//koristi se za inicijalizaciju varijabli, stanja ulaza i izlaza, definiranje koristenih paketa itd.
```

```
//setup se pokrece samo jednom, poslije svakog pokretanja ili resertiranja mikrokontrolera
```

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  pinMode(hallPin1, INPUT);  
  pinMode(hallPin2, INPUT);  
  pinMode(buttonPin, INPUT);  
  pinMode(one,OUTPUT);  
  pinMode(two,OUTPUT);  
  pinMode(three,OUTPUT);  
  pinMode(four,OUTPUT);  
  pinMode(five,OUTPUT);  
  pinMode(six,OUTPUT);  
  pinMode(seven,OUTPUT);  
  pinMode(eight,OUTPUT);  
}
```

```
// funkcije i stanja unutar loop() funkcije se ponavljaju beskonacan broj puta
```

```
void loop() {  
  //citanje tipke za kontrolirano pokretanje mehanizma  
  int buttonState=digitalRead(buttonPin);  
  //citanje stanja hallovih senzora  
  int hallState1=digitalRead(hallPin1);  
  int hallState2=digitalRead(hallPin2);  
  if (hallState1==LOW && hallState2==LOW){hall=1;}  
  if (hallState1==LOW && hallState2==HIGH){hall=2;}  
  if (hallState1==HIGH && hallState2==HIGH){hall=3;}  
  if (hallState1==HIGH && hallState2==LOW){hall=4;}  
  Serial.print(hall);  
  Serial.println();  
  
  //ako je kontrolna tipka pritisnuta kreni na switch() petlju  
  if (buttonState==HIGH) {  
    //switch() petlja pokrece sekvencu paljenja izlaza za cilindre na ventilu  
    //ovisno i stanju na hall senzoru  
    switch(hall) {  
  
      case 1:  
        PORTD = B10100000;//B11000000;//B10100000;  
        PORTB = B11010100;//B11010010;//B11010100;  
        break;
```

case 2:

```
PORTD = B11000000;//B01000000;//B11000000;  
PORTB = B11010010;//B11001011;//B11010010;  
break;
```

case 3:

```
PORTD = B01000000;//B00100000;//B01000000;  
PORTB = B11001011;//B11001101;//B11001011;  
break;
```

case 4:

```
PORTD = B00100000;//B10100000;//B00100000;  
PORTB = B11001101;//B11010100;//B11001101;  
break;}
```

```
}
```

```
//ukoliko tipkalo nije pritisnuto ugasi izlaze na ventilu
```

```
else {PORTD = B00000000;
```

```
PORTB = B11000000;}
```

```
// delay između citanja radi stabilnosti
```

```
delay(20);
```

```
}
```

### **3.3.3. Izrada sustava sinkroniziranog upravljanja pneumatskim cilindrima**

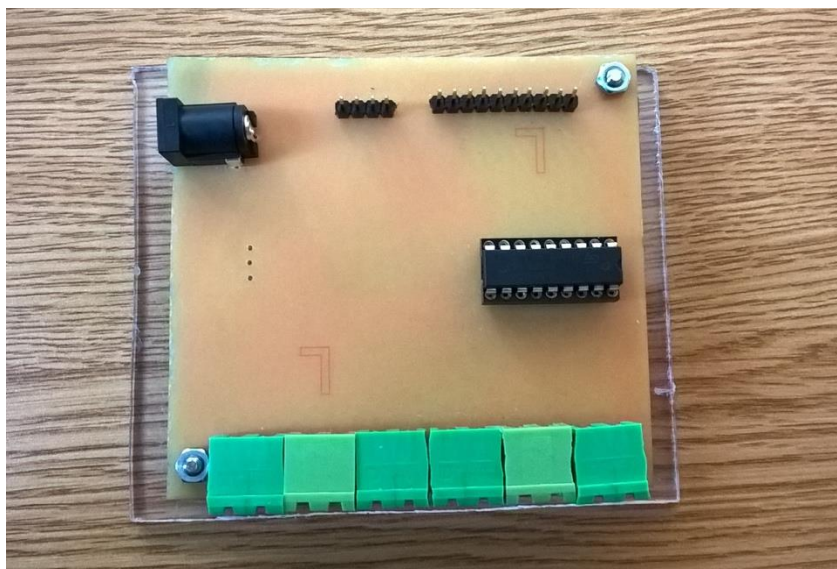
#### **3.3.3.1. Izrada tiskane pločice za sinkronizirano upravljanje matrix ventilom**

Izradi pločice se pristupa foto postupkom. Kao osnovu za izradu koristi se pločica od vitroplast kompozita debljine 1.6 mm namijenja za izradu tiskanih pločica fotopostupkom. Na vitroplastu se nanese sloj bakra debljine 35 µm i fotoosjetljivi lak. Predložak na paus papiru se lijepi na pločicu te osvjetljava UV žaruljom oko 2 min. Fotopostupkom štitimo željeni dio bakra dok će se ostatak u daljnjem postupku otkloniti, Prethodno se priprema razvijач za

fotoosjetljivi lak koji se sastavlja prema omjeru 1 L vode i 7-10 g natrijeva hidroksida . Nakon osvjtljavanja pločica se stavlja u razvijlač. Razvijlač zatim skida osvjtljeni fotolak, dok će neosvjtljeni ostati na površini pločice. Proces razvijanja traje 1 min. Nakon razvijanja, pločica se treba oprati u vodi i osušiti kako bi bila spremna za jetkanje.

Jetkanje je nagrivanje dijela bakra koji nije ostao zaštićen prethodnim postupkom. Temelji se na obradi pločice u otopini solne kiseline i vodikovog peroksida. Postupak jetkanja traje nekoliko minuta te treba biti pažljiv jer je moguće nagrivanje i zaštićenog dijela bakra ukoliko se pločica dugo obrađuje. Nakon jetkanja se nitro razrjeđivačem skida sloj fotolaka s vodova na pločici. Naposljetku se pločica kositri kako bi se vodovi zaštitili od oksidacije.

Komponente se leme na gotovu pločicu i testiranjem vodova multimetrom se utvrđuje ispravnost prethodno odrađenih postupaka. Konačan izgled pločice je prikazan na slijedećoj slici.

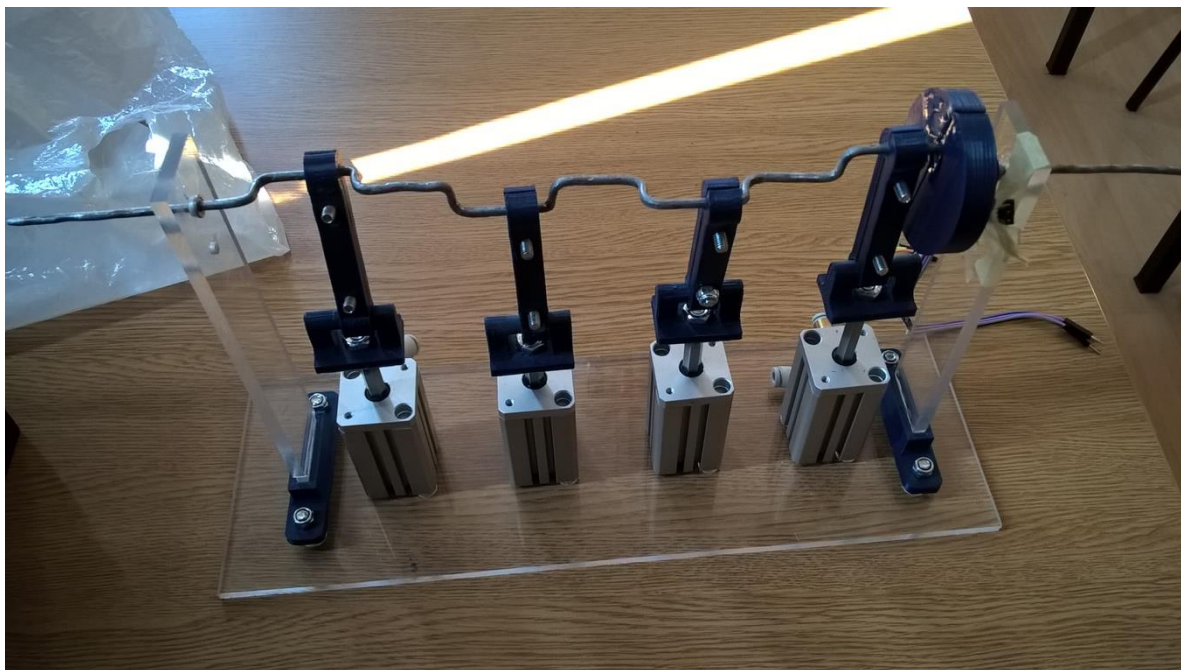


**Slika 3.34. Tiskana pločica za sinkronizirano upravljanje matrix ventilom**

### **3.3.3.2. Izrada makete**

Maketa se izrađuje od pleksiglasa te aditivnom tehnologijom 3D ispisa. Postoje i dijelovi većih dimenzija, a jednostavne geometrije se izrezuju iz ploče pleksiglasa debljine 5mm.

Dijelovi kompleksne geometrije koji služe za povezivanje i funkcionalan rad mehanizma se izrađuju 3D printerom. 3D printer je uređaj koji omogućuje ispis predmeta u trodimenzionalnom prostoru. Prednosti tehnologije 3D ispisa su brza i jeftina proizvodnja, robusna izrada kompleksnih geometrija, mogućnost direktne provjere modela. Tehnologija je također zahvalna kod izrade eksperimentalnih sustava.

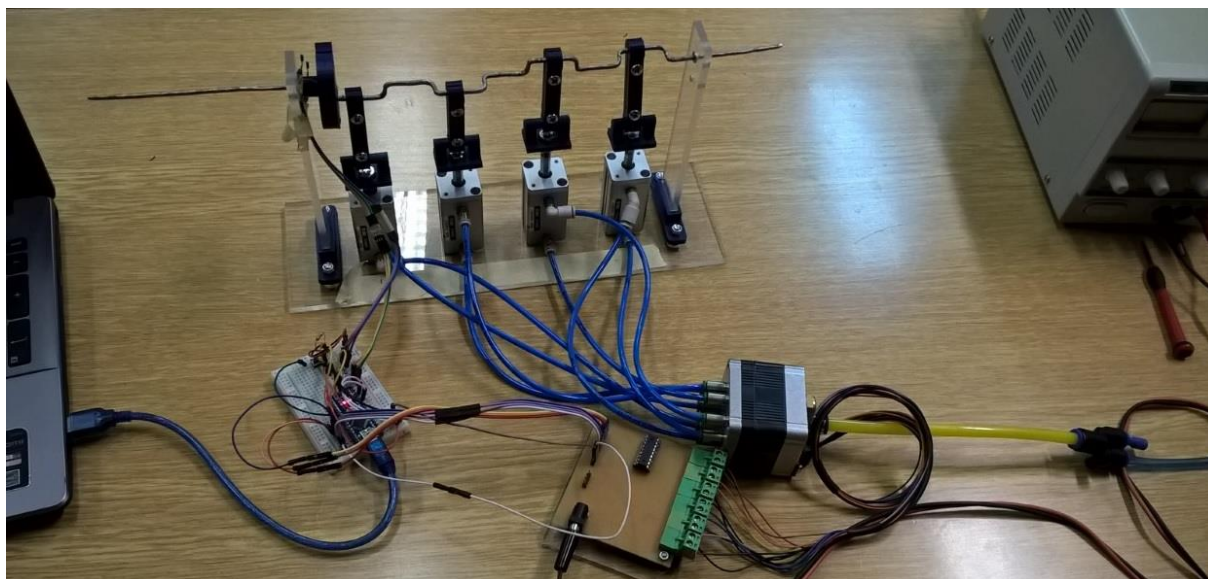


Slika 3.35. Mehanički dio makete

### 3.3.4. Konačni izgled i rad sustava

Nakon što su okupljeni svi dijelovi potrebni za rad sustava najjednostavniji dio projekta je bilo sve spojiti u cjelinu i testirati rad sustava. Na ulazu u Matrix ventil je spojena cijev iz kompresora koji je u trenutku testiranja na izlazu pokazivao tlak zraka od 3 bara. Pločica je spojena na promjenjivi istosmjerni izvor napajanja koji je prema specifikacijama ventila namješten na konstantan iznos od 24 V.





**Slika 3.36. Konačni sustav**

Rezultati rada sustava su bili zadovoljavajući. Strujni signali i algoritam upravljanja iz mikrokontrolera su se pokazali kao dobri te je mehanizam ostvario zamišljena gibanja. Za daljni razvoj moguće je sastaviti robusniju konstrukciju koja bi omogućila implementaciju u realne sustave i pokretanje željenih mehanizama sinkroniziranim gibanjem pneumatskih cilindara.



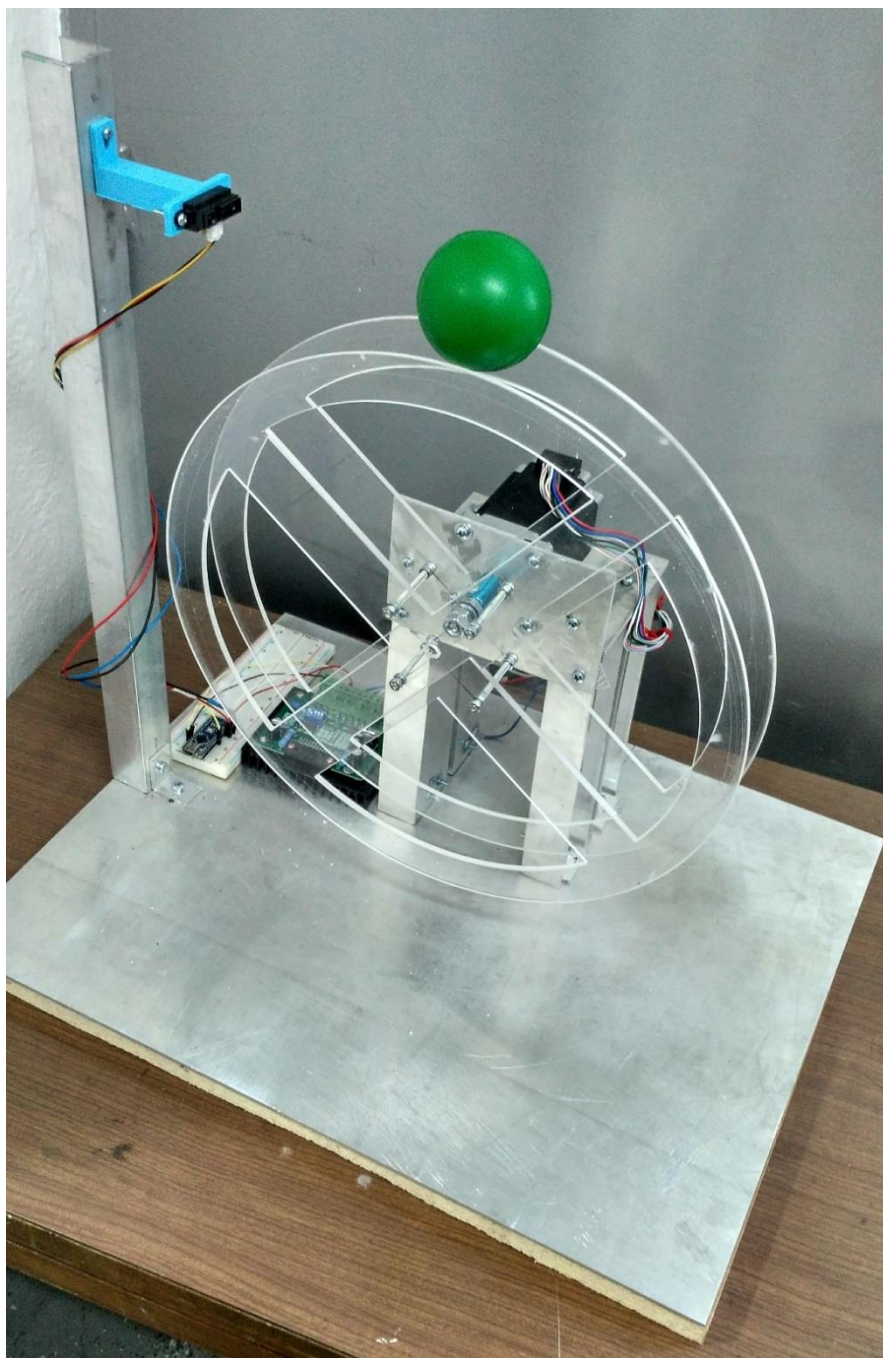
## **4. Mehatronički sustavi s električnim pogonom**

Električni pogon najčešća je vrsta pogona u mehatroničkim sustavima zbog velike raznolikosti mogućih aktuatora te velikog broja načina njihovog upravljanja koje se također odvija pomoću električnih sklopova. Razlozi njihovog masovnog korištenja su visoka efikasnost, relativno velika točnost, tihi rad, velika mogućnost upravljanja i regulacije, mala cijena te dugi životni vijek uz pravilno održavanje. Električni pogoni mogu biti istosmjerni (DC) ili izmjenični (AC) i svaki dolazi sa svojim prednostima i manama. Neki od nedostataka električnih pogona su mala gustoća snage u odnosu na hidrauličke pogone i pogone s motorom s unutrašnjim izgaranjem [23].

Osobama koje tek ulaze u svijet mehatronike električni pogoni su također prvi izbor zbog relativno jednostavne aktualizacije zamišljenog problema te lakšeg upoznavanja s drugim mogućnostima mehatronike.

### **4.1. Mehatronički sustav kuglice na kotaču**

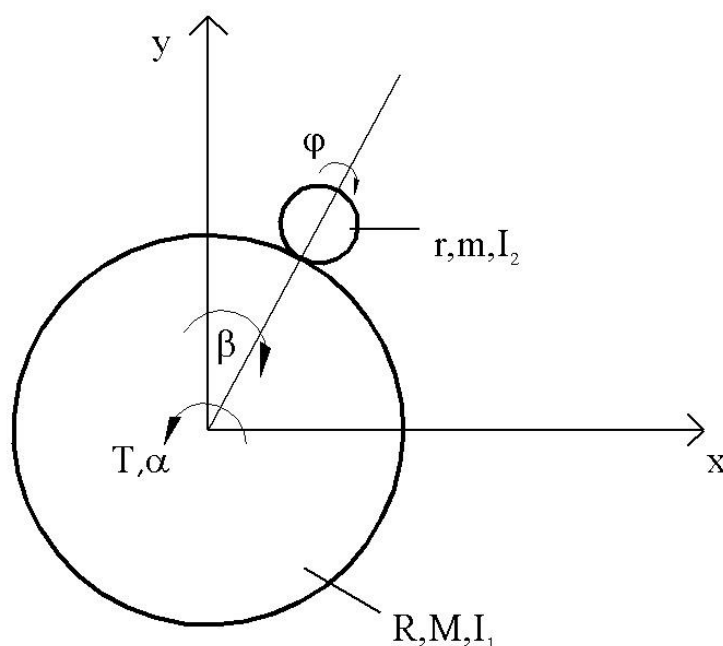
Mehatronički sustav kuglice na kotaču spada u inicijalno nestabilne i podupravljanje sustave što znači da će sustav bez vanjske intervencije prijeći u nestabilnost, a i u slučaju intervencije se ne upravlja svim stupnjevima slobode gibanja sustava čime je proglašen podupravljanim. Ovakvi sustavi su pogodni za edukacijske svrhe jer na vrlo očiti način prikazuju sve prednosti regulacije te se na njima mogu isprobavati različiti regulacijski algoritmi i njihova efikasnost. Sustavu je prvo identificirana dinamika te su izvršene simulacije u MATLAB okruženju sa i bez djelovanja regulatora. Slijedila je izrada stvarne konstrukcije te odabir komponenti: aktuatora, senzora, upravljačkog sklopa te mikrokontrolera. Na izrađenoj konstrukciji isproban je regulacijski algoritam i ona je prikazana na slici 4.1.



**Slika 4.1. Izrađena konstrukcija sustava kuglice na kotaču**

#### **4.1.2. Modeliranje dinamike sustava**

Dinamika sustava također je izvedena pomoću Euler-Lagrangeove metode koja je opisana u prethodnim poglavljima i to na temelju slike 4.2.



Slika 4.2. Skica modela kuglice na kotaču

Sustav je podijeljen na podsustave kuglice i kotača čije se dinamike posebno modeliraju te se dobivene kinetičke i potencijalne energije podsustava zbrajaju u kinetičku i potencijalnu energiju cijelog sustava čije jednadžbe glase:

$$K = \frac{1}{2} \dot{\alpha}^2 I_1 + \frac{I_2}{2r^2} (R^2 \dot{\alpha}^2 - 2Rr \dot{\alpha} \dot{\beta} - 2R^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} + \dot{\beta}^2 (R+r)^2) + \frac{1}{2} m \dot{\beta}^2 (R+r)^2 \quad (4.1.)$$

$$P = mg(R+r) \cos \beta$$

Upravljanje varijable sustava su kut zakreta kotača  $\alpha$  i kut položaja kuglice na kotaču  $\beta$ . Momentom aktuatora djelujemo na kut zakreta kotača dok se na kut položaja kuglice na kotaču djeluje neizravno. Primjenom Euler-Lagrangeove metode i uz uvedene zamjene za lakši prikaz sustava, dobiju se dvije diferencijalne jednadžbe drugog reda koje opisuju dinamiku sustava za upravljane varijable.

$$A_1 = I_2 \left[ \frac{R}{r} + \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right]$$

$$B_1 = I_2 \frac{(R+r)^2}{r^2}, \quad (4.2.)$$

$$C_1 = R+r$$

$$D_1 = I_1 + I_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{T}{I_1}, \quad (4.3.)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{\frac{T}{I_1} \cdot A_1 + mg\beta \cdot C_1}{B_1 + mC_1^2}. \quad (4.4.)$$

### 4.1.3. Simulacija sustava

Sustav se dalje prevodi u prostor stanja čije su značajke također opisane u prethodnim poglavljima. Odabrane varijable stanja su  $\dot{\alpha}$ ,  $\beta$ ,  $\dot{\beta}$ . Model pretvoren u prostor stanja tako ima oblik:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \cdot u, \quad (4.5.)$$

$$y = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \cdot u$$

gdje su matrice **A**, **B**, **C** i **D**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{mgC_1}{B_1 + mC_1^2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_1} \\ 0 \\ \frac{A_1}{I_1(B_1 + mC_1^2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6.)$$

Zadani su sljedeći parametri sustava. Njihove vrijednosti su stvarne vrijednosti, po kasnije izgrađenom realnom sustavu i referiraju se po slici 4.2.

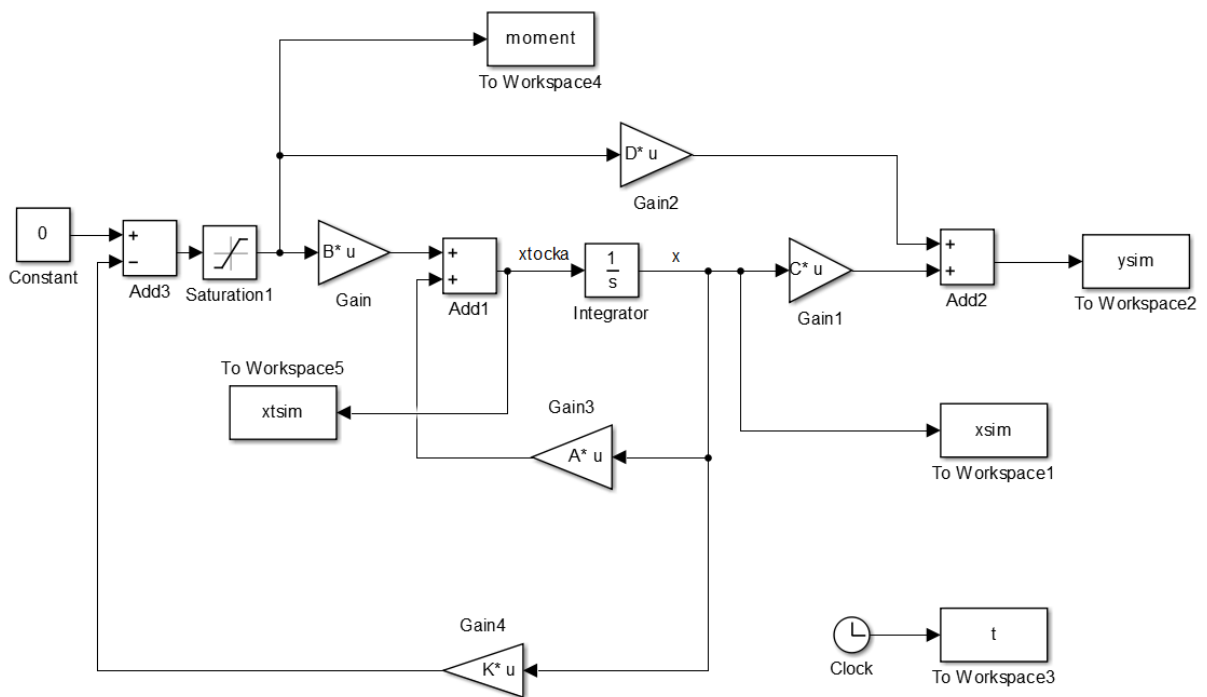
$$r = 0,03 \text{ m}, \quad R = 0,175 \text{ m}, \quad m = 0,15 \text{ kg}, \quad M = 0,6 \text{ kg},$$

$$I_2 = 5,766 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2, I_1 = 0,0103 \text{ kg/m}^2, \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

Odabran je LQR regulator koji je također opisan u prethodnim poglavljima i za gore definirane parametre je dobiven vektor pojačanja  $\mathbf{K}$ :

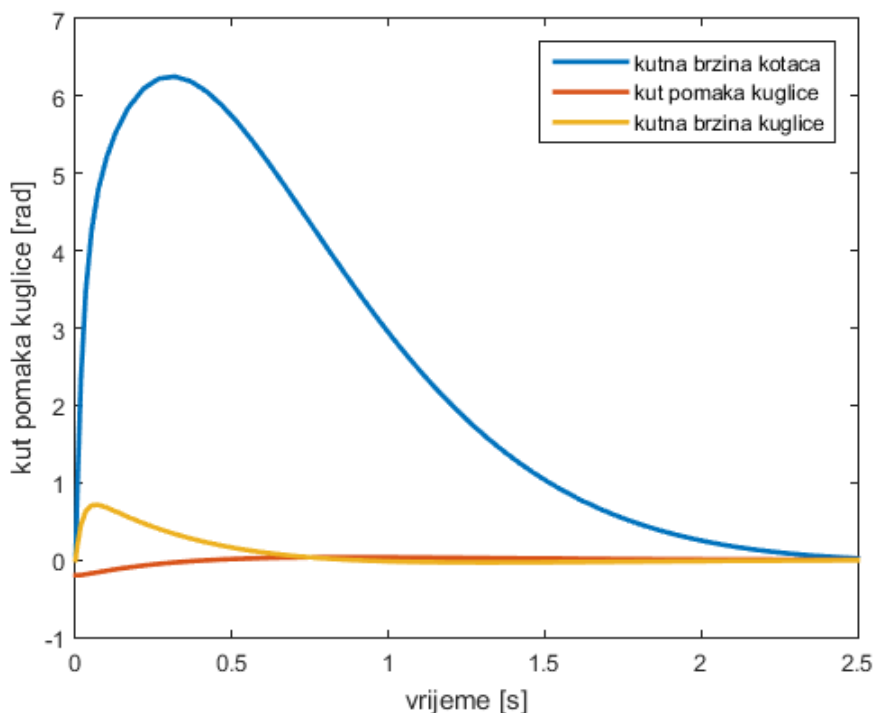
$$\mathbf{K} = [-0,0796 \quad 9,9324 \quad 2,4736]. \quad (4.7.)$$

Na slici 4.3. prikazana je izvedba LQR regulatora u Simulink programskom okruženju.



Slika 4.3. Blok dijagram sustava s regulatorom po varijablama stanja

Na slici 4.4. prikazan je odziv simuliranog sustava. Sa slike se može primjetiti da se sve varijable stanja smiruju u nuli nakon nekog vremena što je bio i cilj regulatora po varijablama stanja.



Slika 4.4. Odziv reguliranog sustava u Simulink programu

#### 4.1.4. Izvedba realnog sustava

Za stvarnu izvedbu sustava bilo je potrebno odabrati sastavne komponente sustava te odabrati materijale od kojih će se konstrukcijski dio sustava izraditi te izabrati način spajanja same konstrukcije i komponenti.

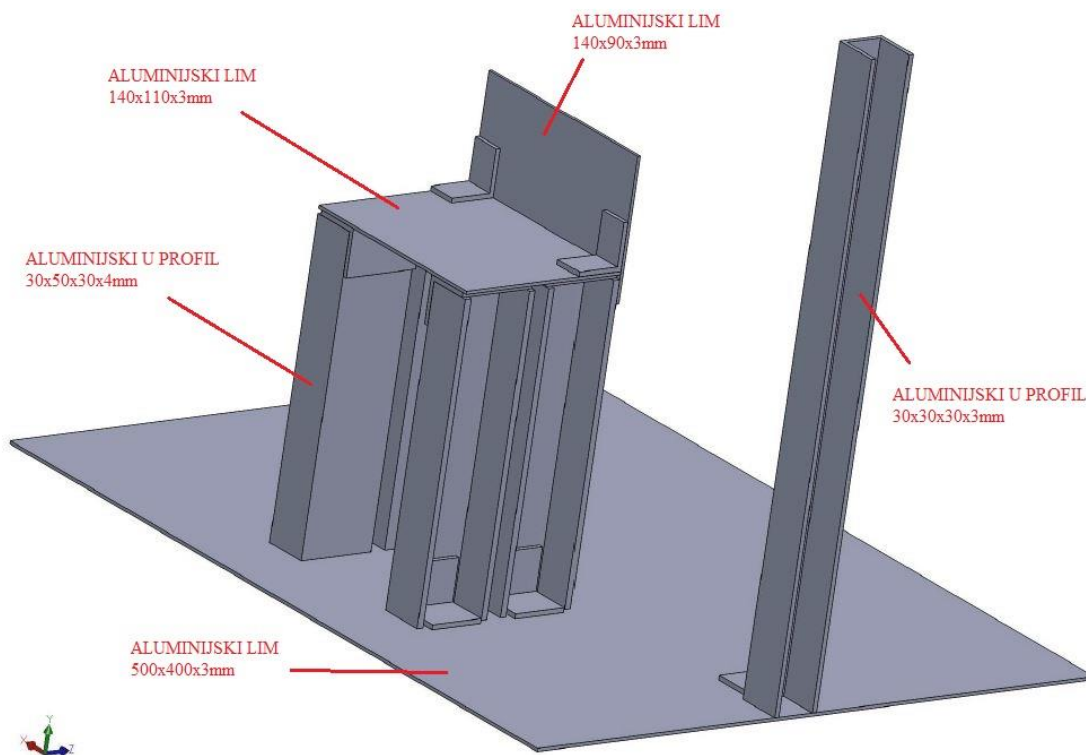
Kao aktuator odabran je koračni električni motor čime je ovaj sustav svrstan u mehatroničke sustave s električnim pogonom. Prilikom odabira aktuatora između ostalog trebalo se paziti i da ima veći nazivni iznos momenta od onog najvišeg dobivenog u simulaciji. Također je odabran upravljački sklop koji je morao imati dovoljnu nazivnu struju u odnosu na odabrani koračni motor.

Za potrebni senzor udaljenosti koji će očitavati poziciju kuglice na kotaču odabran je infracrveni senzor udaljenosti sa mogućnošću mjerenja udaljenosti od 10 do 80 cm u obliku analognog izlaza [24]. Također je odabran Arduino Nano mikrokontroler koji sadrži

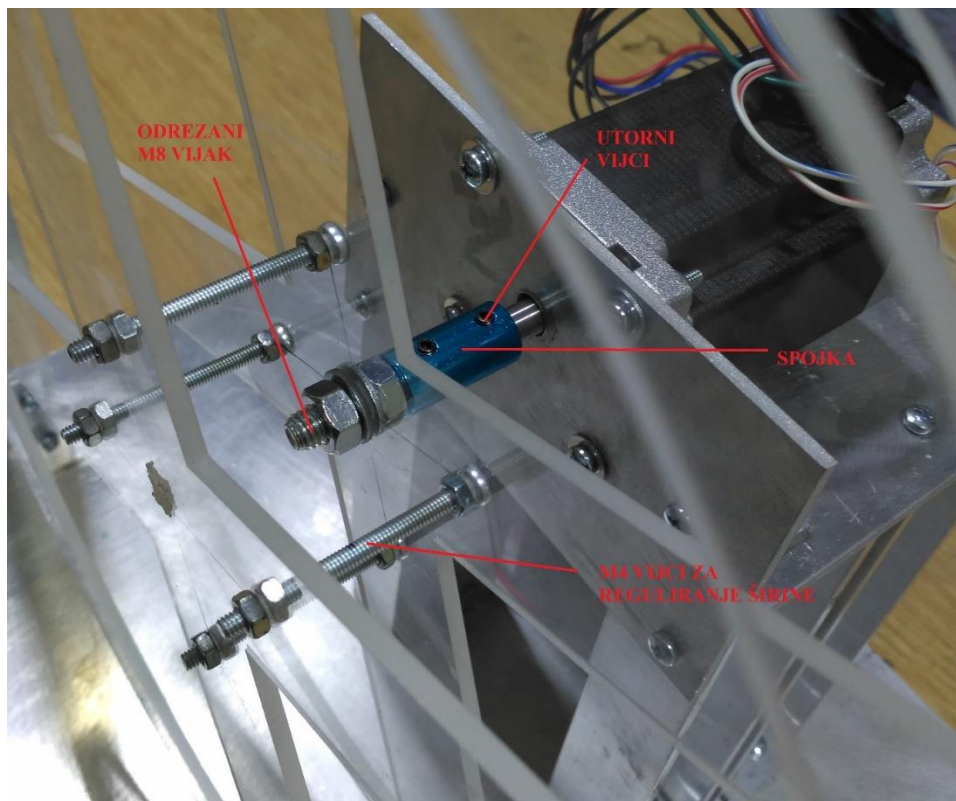
ATMega328P mikroprocesor čija je zadaća po sadržanom regulacijskom algoritmu primati podatke od senzora, procesuirati informacije te davati izlazne naredbe aktuatoru.

Konstrukcija je izrađena od aluminijskih profila te limova dok je sam kotač sastavljen od dva jednaka vodeno rezana komada pleksiglasa u obliku diska. Kotač je spojkom direktno spojen na izlazno vratilo koračnog motora dok je senzor udaljenosti pričvršćen na uspravni aluminijski profil na slici 4.5. Svi su spojevi ostvareni vijčano.

Regulacijski algoritam pisan je u Arduino IDE programskom okruženju koje je bazirano na C++ jeziku te sadrži upotrebu *timer-a* za pokretanje koračnog motora, funkciju za očitavanje mjerenja te dio koda koji se konstantno izvršava u kontroleru u realnom vremenu.



Slika 4.5. Metalni dio konstrukcije



Slika 4.6. Spoj između motora i kotača

#### 4.1.5. Budući planovi razvoja sustava kuglice na kotaču

Kroz ovo poglavlje opisana je realizacija sustava kuglice na kotaču za što je trebalo primijeniti znanje iz raznih područja znanosti; strojarstva, elektronike i računarstva što je i sama srž mehatronike.

Konačna izvedba i ponašanje realnog sustava će se uvijek razlikovati od rezultata dobivenih simulacijom zbog nesavršenosti izvedenog dinamičkog modela, raznih zanemarivanja, nedovoljno dobro napravljene i osmišljene konstrukcije te regulacijskog algoritma. To samo treba služiti kao poticaj daljnjem proučavanju i obrazovanju što je i cilj svakog nastavnog programa. Time će se u budućnosti težiti daljnjem razvitku upravljačkog algoritma i integraciji točnijih senzora.



## 5. Zaključak

Ovim radom su obuhvaćeni mehatronički sustavi s hidrauličkim, pneumatskim i električnim pogonima. Opisane su prednosti i nedostaci pojedinih vrsta pogona te su razmotrene specifičnosti pojedinih sustava koje utječu na točnost i pouzdanost mjerenja ili na složenost upravljanja određenim aktuatorima. Pri konstrukciji mehatroničkih sustava potrebno je uzeti u obzir zahtijevane kriterije i performanse rada sustava. Time se kroz ovaj rad može vidjeti da će primjena hidraulike biti prikladna u sustavima sa zahtjevima za kompaktnom izvedbom i velikom gustoćom snage, a pneumatike u sustavima u kojima je bitno održavanje čistoće radnog prostora uz male zahtjeve za snagom. Primjena električnih pogona se s druge strane ističe pri zahtjevima velike energetske učinkovitosti i tihog rada sustava.

Kroz samostalno projektiranje i izradu nastavnih maketa, studentima je omogućeno praktično potvrđivanje teoretski usvojenih znanja. Time se ukazuje na dodatnu vrijednost ovih radova koji u daljnjim istraživanjima mogu poslužiti kao poticaj i usmjerenje mladim istraživačima.

## **Zahvala**

Zahvaljujemo mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na stalnoj potpori i korisnim savjetima prilikom osmišljavanja i izrade mehatroničkih sustava te pomoći pri nabavi potrebne opreme bez koje praktična realizacija ovih sustava ne bi bila moguća.

Tvrtki SMC Industrijska automatika d.o.o. se zahvaljujemo za donirane pneumatske komponente i pruženu podršku.

## Literatura

- [1] R.H. Bishop: The Mechatronics Handbook, CRC PRESS, 2002.
- [2] Mehatronika, [www.ss-tehnicka-st.skole.hr](http://www.ss-tehnicka-st.skole.hr), (15.4.2017)
- [3] J. Petrić: Hidraulika, Zagreb, 2012.
- [4] Ž. Šitum: Regulacija hidrauličkih i pneumatskih sustava, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] D. Zorc: Mikroprocesorsko upravljanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] N. Kranjčević: Elementi strojeva, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [7] B. Kraut: Strojarski priručnik, Zagreb, 1986.
- [8] Iso Cylinders Series C92, [http://www.smclt.lt/failai/C92\\_EU.pdf](http://www.smclt.lt/failai/C92_EU.pdf), (19.4.2017.)
- [9] Load Cell, 200kg, <https://www.sparkfun.com/products/13332> (23.4.2017.)
- [10] 5 port solenoid valve,  
[http://stevenengineering.com/tech\\_support/pdfs/70D4SVF.pdf](http://stevenengineering.com/tech_support/pdfs/70D4SVF.pdf), (19.4.2017.)
- [11] J. Petrić: Pneumatika i hidraulika - predavanja II dio, prezentacija, FSB
- [12] Ž. Šitum: Podloge za predavanja iz kolegija *Pneumatika i hidraulika*
- [13] The Difference Between Proportional vs. Directional vs. Servo Valves,  
<http://www.qualityhydraulics.com/blog/what-proportional-valve/>, (21.4.2017.)
- [14] [https://www.festo.com/cat/hr\\_hr/data/TRB/81022CC31BCD45CE865A8B39B684C8CC.jpg](https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/TRB/81022CC31BCD45CE865A8B39B684C8CC.jpg), (21.4.2017.)
- [15] Ž. Šitum: Pneumatski mišić kao aktuator, Znanstveno-popularni časopis Sustavi, god. 3, br. 5, str. 54-60.

- [16] Fluidic Muscle DMSP/MAS, katalog, Festo
- [17] <http://3.bp.blogspot.com/30gxU46T4kk/UjXXQ61izHI/AAAAAAAAAN4/siSwKOoyfNc/s1600/m1.jpg> (21.4.2017.)
- [18] T. Šurina, M. Crneković: Industrijski roboti, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [19] T.Šurina: Automatska regulacija, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [20] D. Majetić, J. Kasać: Prostor stanja, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [21] Matrix super brzi ventili, <https://www.bibus.hr/proizvodi-i-rjesenja/pneumatika/ventili-i-upravljanje/matrix-super-brzi-ventili/> (20.4.2017.)
- [22] M. Husnjak: Predavanja iz Teorije mehanizama
- [23] B. Skalicki, J. Grilec: Električni strojevi i pogoni, Zagreb, 2011.
- [24] Sharp, „*GP2Y0A21YK0F datasheet*“, 2006. (17.4.2017.)

## Sažetak

Dalibor Žgela, Nikola Rajčić, Marin Miletić, Hrvoje Selak, Martin Kotarski, Jurica Mustać

### **MEHATRONIČKI SUSTAVI S HIDRAULIČKIM, PNEUMATSKIM I ELEKTRIČNIM POGONIMA**

Mehatronika kao jedna od multidisciplinarnih znanosti, sačinjena od strojarstva, elektrotehnike, elektronike, informacijskih znanosti, a sve više i biologije i društvenih znanosti predstavlja jedno pogodno okruženje za razvoj svjetski popularne STEM revolucije. STEM revolucija predstavlja termin koji obilježava napredak multidisciplinarnosti pod okriljem znanosti, tehnologije, inženjerstva i matematike.

Inspiriran tim trendom, pokrenut je projekt istraživanja mehatroničkih sustava s raznim vrstama pogona, hidrauličkim, pneumatskim i električnim s ciljem razvoja poučnih nastavnih maketa. Izrađene makete mehatroničkih sustava će studentima pružiti mogućnost praktične potvrde teoretski usvojenih znanja i ohrabriti ih ka daljnjem razvoju novih sustava ili poboljšanju postojećih primjenom inovativnih rješenja.

Upravljanje mehatroničkih sustava s hidrauličkim pogonima opisano je kroz projekt upravljanja elektrohidrauličkim robotskim manipulatorom putem mobilnog uređaja sa zaslonom osjetljivim na dodir i Bluetooth veze. Inovativna rješenja iz pneumatike su demonstrirana kroz projekte pneumatske preše s regulacijom sile, sustava kuglice na ploči aktuirane pneumatskim mišićima i sustava koji rješava problem sinkroniziranog rada pneumatskih cilindara upotrebom Matrix ventila. Konačno, električni pogoni će se razmatrati kroz sustav kuglice na kotaču pogonjenim koračnim motorom.

Ključne riječi: mehatronika, strojarstvo, hidraulika, pneumatika, električni pogon

## Summary

Dalibor Žgela, Nikola Rajčić, Marin Miletić, Hrvoje Selak, Martin Kotarski, Jurica Mustać

### **MECHATRONIC SYSTEMS WITH HYDRAULIC, PNEUMATIC AND ELECTRICAL DRIVES**

Mechatronics as one of the multidisciplinary areas, combined of mechanical engineering, electrical engineering, electronics, computer science, along with an increasing contribution of biology and social sciences, represents a suitable environment for development of globally recognized STEM revolution. STEM revolution refers to revolution of science, technology, engineering and mathematics.

Inspired by this trend, a research project on the subject of different drive methods of mechatronic systems, hydraulic, pneumatic and electric, was started. The goal of the project was to enable the students to experimentally confirm theoretically acquired knowledge concerning mechatronic systems. Designed systems will also serve them as an encouragement to involve themselves in development of other mechatronic systems or in improving the existing ones by implementing innovative solutions.

Analysis of a mechatronic system with hydraulic drive is presented through a project dealing with wireless control of an electrohydraulic robotic manipulator by using a mobile device via Bluetooth connection. Innovative solutions regarding pneumatics are demonstrated through projects of pneumatic press with force control, ball on plate system actuated by pneumatic muscles and through system concerning the simultaneous action of multiple pneumatic cylinders using a Matrix valve. Finally, electric drive is represented through a project of ball on wheel actuated by a stepper motor.

Key words: mechatronics, mechanical engineering, hydraulics, pneumatics, electrical drive

## Životopis

**Dalibor Žgela** rođen je 22.11.1994. u Zagrebu. Po završetku Osnovne škole Jure Kaštelana, upisuje zagrebačku XV. gimnaziju tijekom koje je sudjelovao na više državnih natjecanja i europskom projektu Comenius. S obzirom na stalnu zainteresiranost za tehničko područje, upisuje studij strojarstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer Mehatronika i robotika. Tijekom studija mu se dodjeljuju dvije nagrade za izvrsnost studiranja Davorin Bazjanac te Medalja Fakulteta povodom izvrsnog uspjeha tijekom preddiplomskog studija nakon kojeg se redovno upisuje na diplomski studij strojarstva, istog smjera. Tijekom studija razvija više mehatroničkih sustava, kao što su sustav za upravljanje Lego vozilom putem mobilnog uređaja i vlastiti LVDT senzor uz sklop za kondicioniranje signala. U akademskoj godini 2015./2016. obavlja praksu u tvrtki Voith u Njemačkoj. Aktivni je član Udruge mehatroničara, a trenutno razvija metodu upotrebe mobilnog uređaja kao bežičnog programabilnog logičkog kontrolera .

**Nikola Rajčić** rođen je 15.08.1993. u Splitu, a odrastao u Zadru gdje je pohađao Osnovnu školu „Stanovi“. Srednjoškolsko obrazovanje završava 2012. godine u prirodoslovno matematičkoj Gimnaziji „Franje Petrića“. Za vrijeme pohađanja srednje škole prvi put se susreće sa strojarskim tehnologijama u brodogradilištu „Nauta Lamjana“ u mjestu Kali na otoku Ugljanu, odakle mu potječe rodbina. Prediplomski studij strojarstva upisuje 2012. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje na drugoj godini upisuje smjer Mehatronika i robotika, koji završava 2017. godine kada upisuje diplomski studij. Za vrijeme ljetnih praznika radi sezonske poslove u ugostiteljstvu i distribuciji plina i naftnih derivata. U slobodno vrijeme bavi se košarkom i nogometom te je član Udruge mehatroničara.

**Marin Miletić** rođen 06.02.1995. u Klagenfurtu, Republika Austrija. Osnovno školsko obrazovanje stekao je u Osnovnoj školi Smiljevac u Zadru. Nakon završetka osnovne škole, 2009. godine upise Gimnaziju Franje Petrića u Zadru, prirodoslovno-matematički smjer. Tokom srednješkolskog obrazovanja sudjeluje u natjecanjima iz fizike unutar kojih stječe zanimanje za fizikalnu pozadinu tehnike i motivaciju za upis tehničkog fakulteta. Završetkom srednje škole, 2013. godine upisuje redovno Fakultet strojarstva i brodogranje u Zagrebu, smjer strojarstvo. Na drugoj godini izabire smjer Mehatronika i robotika. Nakon uspješnog završenog preddiplomskog studija, u ožujku 2017. godine, obranom završnog rada, prima diplomu sveučilišnog prvostupnika strojarstva s pohvalom (*cum laude*). Iste godine upisuje diplomski studij Mehatronike i robotike. Aktivni je član i voditelj Udruge Mehatroničara. U slobodno vrijeme bavi se amaterski i glazbom.

**Hrvoje Selak** rođen je 23.05.1994. u Zagrebu. Osnovnoškolsko obrazovanje završio je u Osnovnoj školi Popovača 2009. godine. Nakon osnovne škole upisuje prirodoslovno matematičku gimnaziju u Srednjoj školi Tina Ujevića u Kutini, koju završava 2013. godine. Iste godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer Mehatronika i robotika. U ožujku 2017. godine završava preddiplomski redovni studij i upisuje diplomski redovni studij. Član je Udruge mehatroničara.

**Martin Kotarski** rođen je 03.09.1994. u Zagrebu. Osnovnoškolsko i osnovnoškolsko glazbeno obrazovanje stječe u Zaboku u Osnovnoj školi Ksavera Šandora Gjalskog Zabok. Obrazovanje nastavlja upisavši prirodoslovno matematičku gimnaziju Antuna Gustava Matoša također u Zaboku. Iskazuje interes prema tehnici, te 2013. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U ožujku 2017. završava preddiplomski studij strojarstva te upisuje diplomski dio studija smjera Mehatronika i robotika. Član je Udruge mehatroničara. Aktivno



se bavi sportom u Nogometnom klubu Mladost u Zaboku te pleše folkorne plesove u Ansamblu Zabok.

**Jurica Mustać** rođen je 20.05.1995. u Zadru. U Zadru završava obrazovanje u Osnovnoj školi „Zadarski otoci“ 2009. godine te upisuje Gimnaziju Franje Petrića, također u Zadru, iste godine. Završava prirodoslovno matematički smjer 2013. godine te redovno upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje iste godine. Na drugoj godini izabire smjer Mehatronika i robotika. Prima diplomu sveučilišnog prvostupnika strojarstva sa velikom pohvalom (*magna com laude*) početkom 2017. godine. U slobodno vrijeme bavi se sportom te je aktivni član Udruge mehatroničara u kojoj sudjeluje na raznim projektima.