

Projektiranje i regulacija sustava kuglice na ploči pokretanog pneumatskim mišićima

Hodja, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:116699>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Hodja

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Tomislav Hodja

Zagreb, 2015.

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

Iskreno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na interesu i pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem tvrtki Hidropneumatika d.o.o. na trudu, stručnim savjetima i strojnoj obradi.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima na strpljenju i podršci tijekom studiranja.

Tomislav Hodja



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

TOMISLAV HODJA

Mat. br.: 0035164030

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**PROJEKTIRANJE I REGULACIJA SUSTAVA KUGLICE NA
PLOČI POKRETANOG PNEUMATSKIM MIŠIĆIMA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**DESIGN AND CONTROL OF A BALL-ON-PLATE SYSTEM
POWERED BY PNEUMATIC MUSCLES**

Opis zadatka:

Za objašnjenje teorije upravljanja multivarijabilnih nelinearnih sustava poželjni su neki ogledni primjeri koji mogu poslužiti za eksperimentalnu provjeru razvijenih algoritama regulacije. U tu skupinu popularnih laboratorijskih modela spada sustav kuglice na ploči koji pruža mogućnost istovremenog upravljanja položajem i orijentacijom sustava. Balansirajući sustavi predstavljaju intenzivno korištene objekte za istraživanje i testiranje različitih tehnika i algoritama regulacije. Matematički modeli takvih sustava su prilično složeni, sustavi su nestabilni u otvorenom krugu, a uključene su i različite pojave nelinearnosti. Primjena pneumatskih pogona ove negativne učinke u procesu regulacije još dodatno povećava, te su ovakvi modeli prikladni za edukaciju iz područja regulacije, mehatronike, pneumatike, senzorike i dr.

U radu je potrebno:

- Projektirati balansirajući sustav kuglice na ploči pokretan pneumatskim mišićima kao aktuatorima.
- Načiniti izbor komponenti mehaničkog, mjernog i upravljačkog dijela sustava i izraditi nastavnu maketu procesa.
- Izvesti matematički model sustava, načiniti sintezu regulatora i izvršiti simulaciju procesa.
- Razvijene regulacijske algoritme eksperimentalno provjeriti na laboratorijskom modelu.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

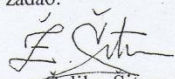
24. rujna 2015.

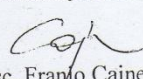
26. studenog 2015.

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zeljko Situm


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA SUSTAVA	2
2.1. Konstrukcija ploče	3
2.2. Konstrukcija pleksiglas ploče i stranica.....	4
2.3. Konstrukcija postolja	5
2.4. Aksijalni kuglični zglob	6
2.5. Ostali dijelovi konstrukcije	7
3. POGONSKE I UPRAVLJAČKE KOMPONENTE SUSTAVA	8
3.1. Pneumatski mišić	8
3.1.1. Povijest pneumatskog mišića	8
3.1.2. Osnove rada	10
3.2. Proporcionalni pneumatski razvodnik	12
3.3. Mikrokontroler Arduino Mega 2560.....	13
3.3.1. Širinsko-impulsna modulacija signala	14
4. MJERNE KOMPONENTE SUSTAVA.....	16
4.1. Žiroskop GY 521	16
4.1.1. Čip MPU 6050	17
4.2. Zaslون osjetljiv na dodir.....	18
4.2.1. Princip rada	18
5. MATEMATIČKI MODEL.....	20
5.1. Linearizacija modela	26
6. SINTEZA REGULATORA I SIMULACIJA SUSTAVA	30
6.1. PID regulator.....	30
6.2. Optimum dvostrukog odnosa	31
6.3. Regulacija sustava.....	33
6.3.1. Regulacija nagiba ploče lineariziranog matematičkog modela.....	33
6.3.2. Regulacijski krug pozicije kuglice lineariziranog matematičkog modela	39
6.3.3. Regulacijski krug pozicije kuglice nelinearnog matematičkog modela.....	47
7. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	50
PRILOG: TEHNIČKA DOKUMENTACIJA.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1: Mehanička konstrukcija sustava	2
Slika 2: Aluminijska ploča	3
Slika 3: Pleksiglas ploča.....	4
Slika 4: Postolje.....	5
Slika 5: Aksijalni kuglični zglob.....	6
Slika 6: Ostali dijelovi konstrukcije	7
Slika 7: McKibben-ov pneumatski mišić	8
Slika 8: ROMAC mišić	9
Slika 9: Robotska šaka tvrtke Shadow Robot Company.....	9
Slika 10: Struktura pneumatskog mišića tvrtke Festo	10
Slika 11: Dijagram ovisnosti sile i kontrakcije pneumatskog mišića [2]	11
Slika 12: Proporcionalni razvodnik 5/3.....	12
Slika 13: Mikrokontroler Arduino Mega 2560	13
Slika 14: Period PWM signala [7].....	15
Slika 15: Tiskana pločica žiroskopa.....	16
Slika 16: Shema spajanja Arduina i žiroskopa.....	17
Slika 17: Čip MPU 6050 [8]	17
Slika 18: Otporni zaslon osjetljiv na dodir.....	18
Slika 19: Princip rada otpornog zaslona osjetljivog na dodir.....	19
Slika 20: Koordinatni sustav kuglice na ploči.....	20
Slika 21: Blok dijagram nelinearnog modela	24
Slika 22: Provjera ispravnosti nelinearnog modela pozicije kuglice za nulte početne uvjete..	25
Slika 23: Provjera ispravnosti nelinearnog modela kuta nagiba ploče za nulte početne uvjete	26
Slika 24: Blok dijagram lineariziranog modela.....	28
Slika 25: Provjera ispravnosti lineariziranog modela pozicije kuglice za nulte početne uvjete	28
Slika 26: Provjera ispravnosti lineariziranog modela kuta nagiba ploče za nulte početne uvjete	29
Slika 27: Blok-shema regulacijskog kruga s PID regulatorom [10]	30
Slika 28: Regulacijski krug kuta nagiba ploče	33
Slika 29: Regulator kuta nagiba ploče.....	33
Slika 30: Regulacijski krug kuta nagiba ploče s kompenzacijom poremećaja momenta.....	34
Slika 31: Regulacijski krug nagiba ploče na kojem se temelji sinteza PID regulatora.....	34
Slika 32: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče bez prefiltra, odziv kuta nagiba ploče.....	36
Slika 33: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče bez prefiltra, odziv okretnih momenata	37
Slika 34: Regulacijski krug kuta nagiba ploče s prefiltrom	38
Slika 35: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče s prefiltrom, odziv kuta nagiba ploče.....	38
Slika 36: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče s prefiltrom, odziv okretnih momenata	39
Slika 37: Odziv PT_3 člana podešenog za optimalno prigušenje i nadomjesnog PT_1 člana.....	40
Slika 38: Regulacijski krug pozicije kuglice s podređenim ekvivalentnim krugom dinamike ploče	40
Slika 39: Regulator pozicije kuglice	41

Slika 40: Regulacijski krug pozicije kuglice na ploči bez prefiltra.....	42
Slika 41: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv pozicije kuglice.....	43
Slika 42: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv kuta nagiba ploče.....	43
Slika 43: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv okretnih momenata	44
Slika 44: Regulacijski krug pozicije kuglice s prefiltrom	45
Slika 45: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv pozicije kuglice	45
Slika 46: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv kuta nagiba ploče	46
Slika 47: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv okretnih momenata	46
Slika 48: Nelinearni regulacijski krug pozicije kuglice s prefiltrom	47
Slika 49: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv pozicije kuglice	47
Slika 50: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv kuta nagiba ploče.....	48
Slika 51: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv okretnih momenata	48

POPIS TABLICA

Tablica 1: Karakteristike pneumatskog mišića.....	10
Tablica 2: Karakteristike proporcionalnog pneumatskog razvodnika.....	12
Tablica 3: Karakteristike Arduino Mega 2560.....	14
Tablica 4: Dimenzije zaslona.....	19
Tablica 5: Karakteristike zaslona.....	19
Tablica 6: Parametri sustava kuglice na ploči.....	25

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
01-00-000	Mehanička konstrukcija sustava za regulaciju kuglice na ploči
01-00-001	Postolje
01-00-002	Ušica
01-00-003	Navojna šipka
01-00-004	Cijev s navojem
01-00-005	Svornjak
01-00-006	Aluminijska ploča
01-00-007	Pleksiglas ploča
01-00-008	Pleksiglas stranica manja
01-00-009	Pleksiglas stranica veća
01-00-0010	Pleksiglas stranica s provrtom

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m^3	Gustoća
m	kg	Masa
α	rad	Kut nagiba oko x osi
β	rad	Kut nagiba oko y osi
T_H	s	Radni dio perioda impulsa
T_L	s	Mirujući dio perioda impulsa
K	J	Kinetička energija
P	J	Potencijalna energija
m_k	kg	Masa kuglice
I_k	kgm^2	Moment inercije kuglice
\dot{x}_k	m/s	Brzina translacije kuglice u smjeru x osi
\dot{y}_k	m/s	Brzina translacije kuglice u smjeru y osi
ω_x	rad/s	Kutna brzina u smjeru x osi
ω_y	rad/s	Kutna brzina u smjeru y osi
r_k	m	Polumjer kuglice
$\dot{\alpha}$	rad/s	Kutna brzina nagiba oko x osi
$\dot{\beta}$	rad/s	Kutna brzina nagiba oko y osi
g	m/s^2	Gravitacijska akceleracija
h	m	Visina položaja težišta mase kuglice
τ_x	Nm	Okretni moment oko x osi
τ_y	Nm	Okretni moment oko y osi
m_p	kg	Masa ploče
I_{px}	kgm^2	Moment inercije ploče u smjeru x osi
I_{py}	kgm^2	Moment inercije ploče u smjeru y osi
A_p	m^2	Površina ploče
\ddot{x}_k	m/s^2	Ubrzanje kuglice u smjeru x osi
\ddot{y}_k	m/s^2	Ubrzanje kuglice u smjeru y osi
$\ddot{\alpha}$	rad/s^2	Kutna brzina u smjeru x osi
$\ddot{\beta}$	rad/s^2	Kutna brzina u smjeru y osi
T	s	Vremenska konstanta
K_r	-	Pojačanje regulatora
x_0	m	Početni uvjet pozicije kuglice u smjeru x osi
y_0	m	Početni uvjet pozicije kuglice u smjeru y osi
x_{ref}	m	Referentna pozicija kuglice u smjeru x osi
y_{ref}	m	Referentna pozicija kuglice u smjeru y osi

SAŽETAK

Sustav kuglice na ploči je klasičan edukacijski primjer kod kojeg je cilj dovesti kuglicu u određenu poziciju neovisno o njezinoj trenutnoj poziciji i eventualnim poremećajima koji djeluju na sustav. Radi se o proširenju sustava kuglice na gredi tako da je dodana još jedna os te dodatno zakompliciran kako konstrukcijski tako i matematički pristup rješavanju problema. Sustav se sastoji od kuglice, ploče, senzora i aktuatora koji zakreću ploču te djeluju na kuglicu čijom pozicijom se želi upravljati.

Tema ovog diplomskog rada izabrana je kako bi se utemeljila postojeća znanja stečena tijekom studija i stekla nova iz područja razvijanja konstrukcija, pneumatike, upravljanja pomoću mikrokontrolera i metoda regulacije.

Sustav kuglice na ploči je izvrstan edukacijski primjer, jer omogućava ispitivanje različitih metoda regulacije.

U radu se pristupa projektiranju konstrukcije sustava za upravljanje pozicijom kuglice, odabiru mehaničkih komponenti mjernog i upravljačkog dijela sustava, matematičkom modeliranju sustava, sintezi regulatora i izradi nastavne makete procesa.

Ključne riječi: regulacija, regulator, mikrokontroler, kuglica, ploča.

SUMMARY

The Ball on Plate system is a classical educational example where the goal is to lead the Ball to a specific position independently of its current position and eventual disturbances which act on the system. The system consists of a ball, plate, sensors and actuators that tilt the plate and in that way act on a ball which position is controlled.

This thesis is chosen in order to fortify existing knowledge acquired during college and gain new from construction development, pneumatics, microcontroller's and control methods.

The Ball on Plate system is an excellent educational example because it allows the testing of different control methods.

In the thesis the approach is to construction development for controlling the ball on a plate, the selection of mechanical parts for measuring and controlling, mathematical modeling of the system, controller synthesis and building the teaching model.

Key words: control, controller, microcontroller, ball, plate.

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada odabrana je u svrhu utemeljenja postojećeg znanja stečenog tijekom studija i daljnjeg učenja. Diplomski rad se bavi projektiranjem sustava za balansiranje kuglice na ploči. Radi se o interdisciplinarnom projektu u kojeg spadaju razvoj konstrukcije, izbor mehaničkih komponenti mjernog i upravljačkog dijela sustava, matematičkom modeliranju, sintezi regulatora i izradi nastavne makete.

Sustav kuglice na ploči je klasičan edukacijski primjer kod kojeg je cilj dovesti kuglicu u određenu poziciju neovisno o njezinoj trenutnoj poziciji i eventualnim poremećajima koji djeluju na sustav. Radi se o proširenju sustava kuglice na gredi tako da je dodana još jedna os, te dodatno zakompliciran kako konstrukcijski tako i matematički pristup rješavanju problema. Sustav se sastoji od kuglice, ploče, senzora i aktuatora koji zakreću ploču te djeluju na kuglicu čijom pozicijom se želi upravljati.

Sustav kuglice na ploči je nelinearan, nestabilan i podupravljan sustav što znači da ima više stupnjeva slobode gibanja nego upravljačkih varijabli. Konkretno se radi o četiri stupnja slobode gibanja, dva kutna zakreta ploče i dva linearna pomaka kuglice, a upravljanje se odvija sa četiri pneumatska mišića koji mogu djelovati na samo dva stupnja slobode gibanja, tj. na dva kutna zakreta ploče preko kojih se upravlja pozicijom kuglice na ploči.

U radu je opisana mehanička konstrukcija sustava, od izbora materijala do propisivanja tehnologija potrebnih za izradu konstrukcije. Kompleksnost rada izražena je u projektiranju konstrukcije koju je moguće aktuirati pneumatskim mišićima. Pneumatski mišići u regulacijskoj tehnici predstavljaju svojevrsan izazov, iz razloga što je njihovo ponašanje izrazito nelinearno, što zbog njihove konstrukcije koja je elastična, što zbog medija, odnosno zraka koji je stišljiv. Nadalje je prikazan izbor komponenti potrebnih za rad, poput proporcionalnog razvodnika koji upravlja pneumatskim mišićima, mjernih komponenti od kojih je za mjerenje kuta nagiba zadužen troosni žiroskop, a za mjerenje pozicije kuglice korišten je otporni zaslon osjetljiv na dodir (engl. resistive touch screen).

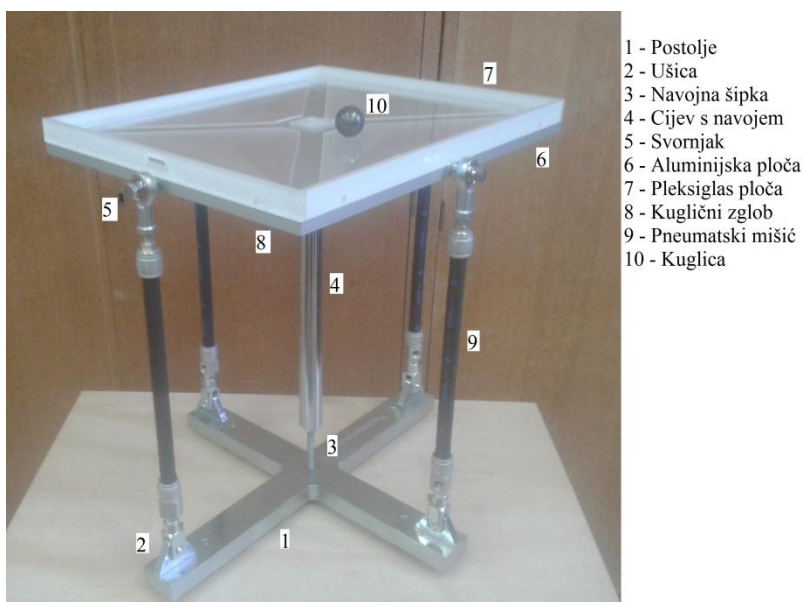
U konačnici je izveden matematički model sustava te prikazana sinteza regulatora. Napravljena je simulacija sustava u programskom okruženju MATLAB te prikazani rezultati odziva.

2. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA SUSTAVA

Sustav kuglice na ploči uobičajeno se izrađuje korištenjem električnih aktuatora poput servomotora koji uvelike olakšavaju konstruiranje mehaničkog sustava i samu regulaciju. Prednost korištenja servomotora u odnosu na pneumatske aktuatore je brzina odziva te mjerna komponenta poput enkodera ugrađena u sam servomotor, što rješava problem mjerenja kuta zakreta servomotora.

Dizajniranje mehaničke konstrukcije krenulo je iz aspekta zadovoljavanja zahtjeva kako aktuatori koji će zakretati ploču oko dviju osi moraju biti pneumatski mišići. Razmotreno je niz mogućih mehaničkih rješenja problema i odabrano optimalno. Pneumatski mišići smješteni su na postolju u obliku križa te pričvršćeni pomoću ušica na postolje i vilica pričvršćenim vijčanim spojem na mišić.

Kako bi mogli zakretati ploču pneumatski mišići su spojeni ušicama i svornjakom s pločom. Ploča se mora zakretati oko dvije osi oko fiksne točke koja se nalazi u centru ploče. Kako bi se to postiglo ploča je montirana na aksijalni kuglični zglobovi koji je preko vijčanog spoja spojen s pločom i preko cijevi s navojem podesive po visini spojen s postoljem. Spoj između cijevi s navojem i postolja je vijčani.



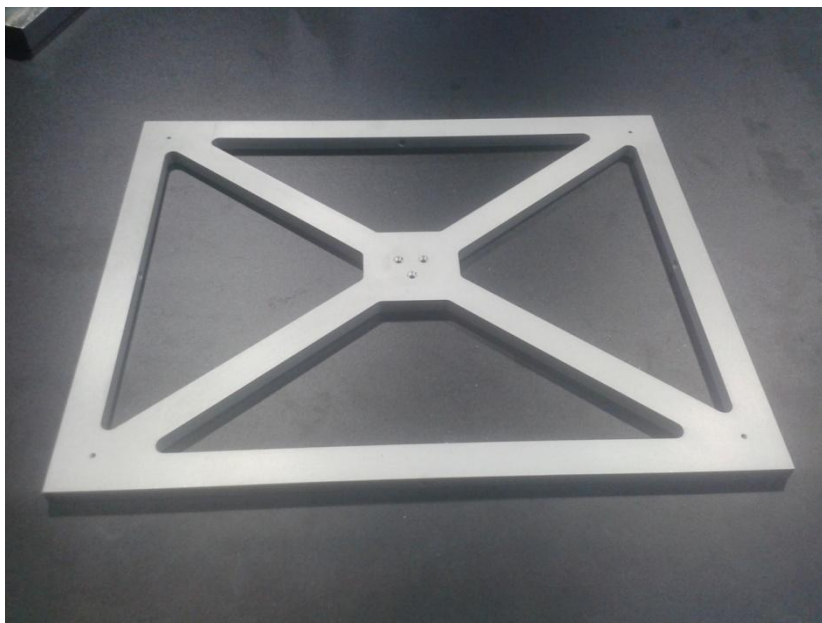
Slika 1: Mehanička konstrukcija sustava

Upravljanje pneumatskim mišićima odvija se pomoću proporcionalnih ventila koji dobivaju naponski signal od mikrokontrolera. Za određivanje pozicije kuglice koristi se zaslon osjetljiv na dodir koji je pričvršćen na ploču. Nagib ploče mjeri se pomoću troosnog žiroskopa i akcelerometra.

2.1. Konstrukcija ploče

Zahtjevi postavljeni na konstrukciju ploče su što je moguće manja masa, dovoljna čvrstoća i krutost. Iz navedenih je zahtjeva kao konstrukcijski materijal izabran aluminij. Aluminij ima gustoću $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ zbog koje ima relativno malu masu te iz toga proizlaze i mali momenti inercije, što je bitno zbog odabira odgovarajućeg načina pričvršćenja pneumatskih mišića na ploču.

Dimenzija ploče određena je dimenzijom zaslona osjetljivog na dodir čije su eksterne dimenzije 355x288x1,8 mm. Iz konstrukcijskih razloga dimenzija ploče iznosi 370x300x10 mm. Masa pune ploče sirovca dimenzija 400x400x12,5 mm iznosi približno 5,5 kg što je previše. Iz tog razloga je odlučeno smanjiti masu ploče tako da se na CNC stroju izvrši obrada glodanja, te se njezina masa smanji na približno 1 kg što je prihvatljivo.

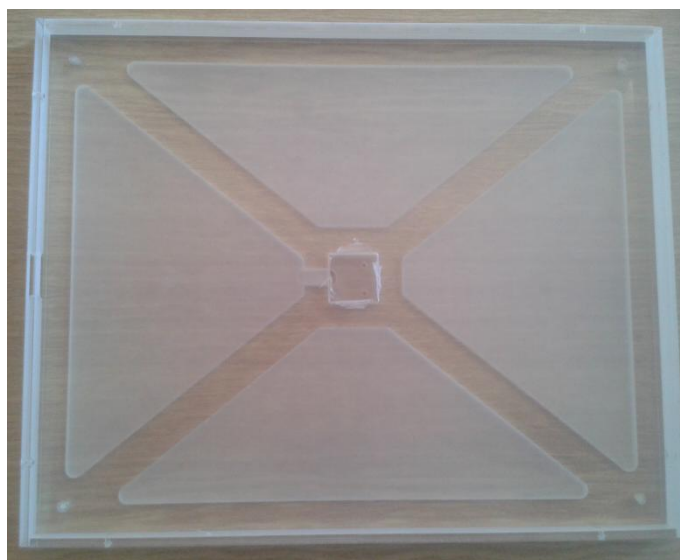


Slika 2: Aluminijska ploča

Stroj na kojem je izvršena strojna obrada glodanja je obradni centar Hurco VMX 24t. Tehnološki postupak strojne obrade aluminijske ploče započeo je bušenjem tehnoloških provrta pomoću kojih se ploča pričvrstila na radni stol stroja. Nadalje je iz sirovca dimenzija 400x400x12,5 mm strojnom obradom glodanja dobivena kontura ploče dimenzija 370x300x12,5 mm. Na sirovcu se zbog skladištenja napravio sloj oksida kojeg je bilo potrebno ukloniti, te je iz tog razloga izvršena obrada glodanja ploče s donje i gornje strane, na kraju kojeg je ploča svedena na dimenzije 370x300x10 mm. Strojnom obradom glodanja ploča je nadalje obrađena kako je prikazano u tehničkoj dokumentaciji. Na kraju strojne obrade aluminijska je ploča eloksirana kako bi se zaštitila od korozije. Na slici 2 je prikazana strojno obrađena aluminijska ploča koja se montira pomoću tri M3 vijka na aksijalni kuglični zglob za kojeg se provrti s navojima nalaze na centru ploče. Nadalje se na ploču isto pomoću četiri M3 vijka smještenih na rubovima montira pleksiglas ploča sa stranicama koje sprečavaju ispadanje kuglice.

2.2. Konstrukcija pleksiglas ploče i stranica

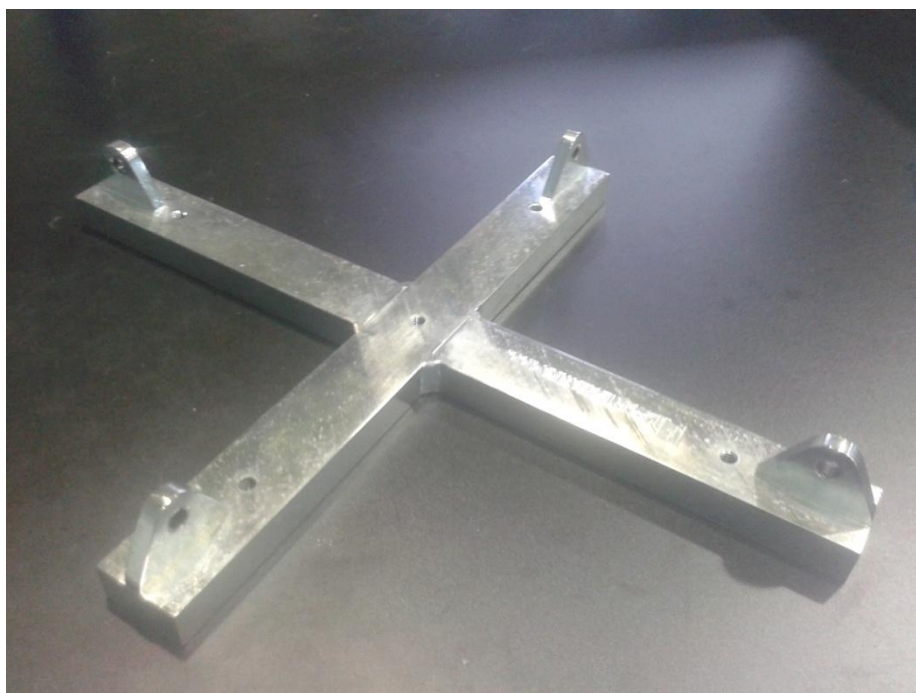
Odlučeno je na aluminijsku ploču M3 vijcima pričvrstiti prozirnu ploču od pleksiglasa kako bi se u njezin centar mogao smjestiti troosni žiroskop pomoću kojeg se mjeri kut nagiba ploče. Na rubove pleksiglasa su pričvršćene stranice istog materijala kako bi se osiguralo da kuglica ne može ispasti sa sustava što će u početku olakšati rad.



Slika 3: Pleksiglas ploča

2.3. Konstrukcija postolja

Što se tiče konstrukcije postolja, potrebno je zadovoljiti samo uvjet robusnosti, tj. kada počinju raditi pneumatski mišići pod tlakom, postolje mora održavati cijeli sustav stabilnim, bez pomicanja. Postolje mora imati nešto veću masu nego što je cjelokupna masa konstrukcije koju nosi. Zbog same izvedbe pričvršćenja pneumatskih mišića nemoguće je da dođe do prevrtanja konstrukcije sustava. Postolje je izvedeno iz dva čelična pravokutna profila zavarena u križ. Odabran postupak zavarivanja je elektrolučno zavarivanje, taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (CO₂). Zbog nemogućnosti da postolje održi kutnost nakon zavarivanja, dodane su gumene noge s navojem podesive po visini kako bi se mogla namjestiti kutnost. U centru postolja napravljen je upust i narezan navoj M8 LH kako bi se mogla maticom i navojnim vretenom s M8 LH navojem spojiti cijev s navojem koja nosi ostatak konstrukcije. Iz estetskih razloga postolje je cinčano.



Slika 4: Postolje

2.4. Aksijalni kuglični zglob

Aksijalni kuglični zglob [1] služi kako bi omogućio zakretanje ploče oko svoje dvije osi, kutovima zakretanja α i β . Također aksijalni kuglični zglob preuzima na sebe sile nastale momentima inercija koji su posljedica zakretanja ploče pomoću pneumatskih mišića. Ugrađeni aksijalni kuglični zglob naručen je od tvrtke SMC.

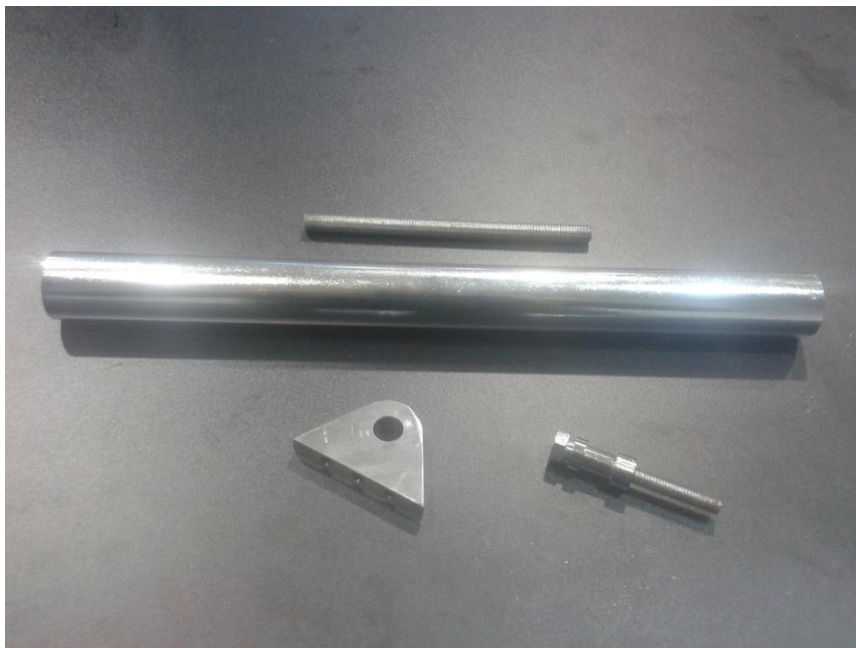


Slika 5: Aksijalni kuglični zglob

Na gornjoj slici je prikazan aksijalni kuglični zglob koji ima mogućnost zakretanja u svim smjerovima $\sim 15^\circ$. Svrha u koju je originalno izrađen je vakuumsko hvatanje raznih objekata preko gumene podloge koja osigurava dobar prihvat na raznim površinama i brtvljenje koje osigurava zahtijevani vakuum. Kod sustava za balansiranje kuglice aksijalni kuglični zglob korišten je samo kako bi omogućio zakretanje ploče oko dvije osi istovremeno te je zbog toga skinuta gumena podloga.

2.5. Ostali dijelovi konstrukcije

Dijelovi poput ušica i vilica pneumatskih mišića naručeni su od tvrtke Festo. Cijev s navojem, navojnu šipku, ušice, svornjake i samu ploču izradila je tvrtka Hidropneumatika d.o.o. iz Svetog Ivana Zeline. Ploču i stranice od pleksiglasa izradila je tvrtka Nova Forma d.o.o. iz Zagreba. Kako se ne radi o standardnim dijelovima, svaki pojedini dio je posebno konstruiran te je njegov tehnički crtež prikazan u prilogu.



Slika 6: Ostali dijelovi konstrukcije

3. POGONSKE I UPRAVLJAČKE KOMPONENTE SUSTAVA

Za pogonski dio sustava odabrana su četiri pneumatska mišića DMSP-10-200N-RM-CM tvrtke Festo. Kako bi se moglo njima upravljati nabavljena su dva pneumatska proporcionalna razvodnika MPYE-5-1/8 HF-010B također od tvrtke Festo, od kojih svaki upravlja s dva pneumatska mišića. Za upravljanje pneumatskim proporcionalnim razvodnikom, procesiranje podataka s žiroskopa i zaslona osjetljivog na dodir koristi se mikrokontroler Arduino Mega 2560.

3.1. Pneumatski mišić

Kako je već navedeno, kao aktuatori su odabrana četiri pneumatska mišića DMSP-10-200N-RM-CM[2]. Iz oznake se može iščitati kako se radi o mišićima promjera 10 mm i dužine 200 mm. Na jednoj strani mišića nalazi se radijalni otvor za priključak za dovod zraka, dok je sa druge strane mišić zatvoren.

Pneumatski mišić je aktuator koji djeluje slično kao prirodni mišić što određuje njegova konstrukcija. Radi se o aktuatoru koji je primarno osmišljen u medicinske svrhe te se koristio kod fizioterapije. Danas se pneumatski mišići koriste u mnogo široj primjeni, poput robotike, automatizacije te u edukativne svrhe.

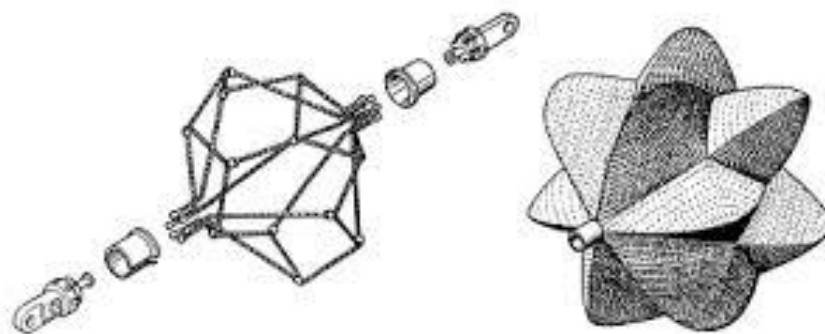
3.1.1. Povijest pneumatskog mišića

Prvi pneumatski mišić izumio je fizičar Joseph L. McKibben 1957. godine. Mišić je nazvan po njemu McKibbenov mišić [3]. Mišić se sastoji od unutarnje gumene cijevi i vanjskog pletenog omotača od tkanine. Princip rada mišića je sljedeći, kada se u mišić dovede stlačeni zrak, membrana mišića radijalno ekspandira i aksijalno kontrahira izazivajući vlačnu silu.



Slika 7: McKibben-ov pneumatski mišić

Postoje razne izvedbe pneumatskih mišića, jedan od zanimljivijih je *ROMAC* mišić [3] (eng. RObotic Muscle ACtuator) kojeg su konstruirali G. Immega i M. Kukulj 1986. u SAD-u. Mišić je izrađen od unutarnje žičane konstrukcije i vanjske slabo rastezljive obloge zbog čije iznimne čvrstoće se mogu postići visoke sile.



Slika 8: ROMAC mišić

Tokom godina pneumatski mišići su zbog svog povoljnog odnosa mase i ostvarene sile našli sve češću upotrebu. Tvrtka Shadow Robot Company [3] krenula je korak dalje te integrirala 40 pneumatskih mišića kako bi ostvarila 24 pokreta robotske šake te se tako približila mogućim gibanjima i pokretima prstiju ljudske šake.



Slika 9: Robotska šaka tvrtke Shadow Robot Company

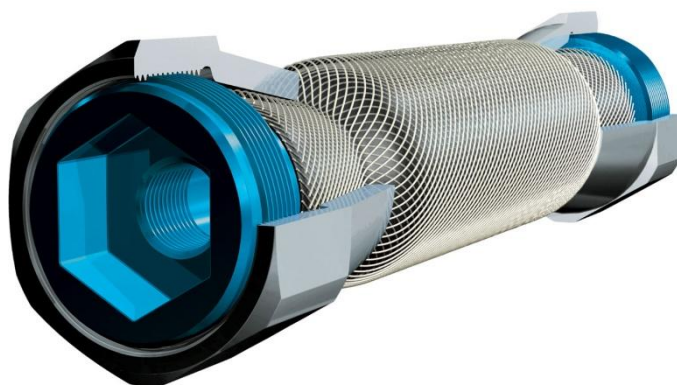
3.1.2. Osnove rada

Pneumatski mišići su aktuatori koji se odlikuju svojom prirodnom elastičnošću zbog koje se ponašaju vrlo slično kao ljudski mišići. Imaju odličan omjer mase i sile zbog čega ih se sve više koristi u robotici. Nedostatak pneumatskih mišića je njihovo nelinearno dinamičko ponašanje i nemogućnost precizne regulacije. Pneumatski mišići korišteni tokom izrade ovog rada imaju karakteristike prikazane u tablici 1.

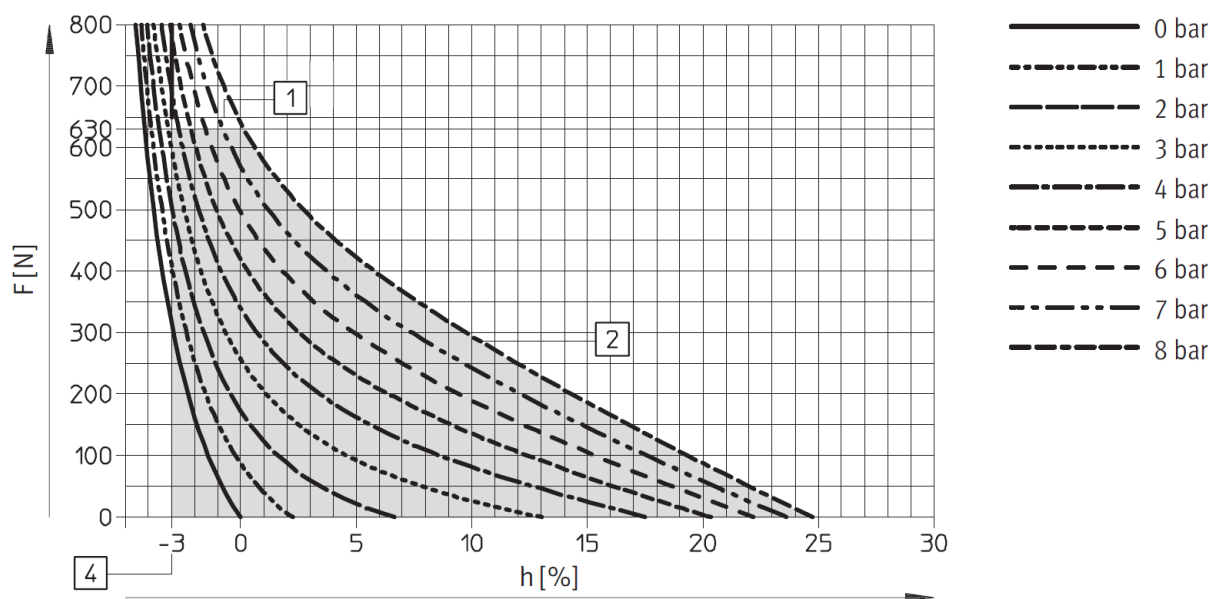
Tablica 1: Karakteristike pneumatskog mišića [2]

KARAKTERISTIKA	VRIJEDNOST
Radni tlak	0...8 bar
Promjer unutarnje cijevi	10 mm
Nominalna dužina cijevi	200 mm
Maksimalno dopušteno istežanje	3% nominalne dužine
Maksimalna dopuštena kontrakcija	25% nominalne dužine
Radni medij	stlačeni zrak
Maksimalna sila podizanja	630 N
Gubitak zraka	< 1 l/h
Dozvoljena radna temperatura	-5...+60 °C

Pneumatski mišići izrađeni od tvrtke Festo sastoje se od gumene cijevi ojačane unakrsno isprepletenim vlaknima kao što je prikazano na donjoj slici.



Slika 10: Struktura pneumatskog mišića tvrtke Festo



Slika 11: Dijagram ovisnosti sile i kontrakcije pneumatskog mišića [2]

Na prethodnoj slici prikazan je dijagram ovisnosti sile i kontrakcije pneumatskog mišića kod različitih tlakova. Na slici je vidljivo kako je kod 0 % kontrakcije mišića sila najveća, a nadalje kako mišić kontrahira, sila pada. Kod 25 %, odnosno maksimalne kontrakcije sila padne na 0 N.

Radni tlak za upravljanje pneumatskim mišićima u ovom projektu iznosi 3 bar, kod kojeg prema prethodnom dijagramu mišić kontrahira 13 % bez opterećenja, što na njegovu dužinu od 200 mm iznosi 26 mm, te daje male zakrete ploče. Osim toga, na manjim tlakovima mišići kontrahiraju sporije zbog stišljivosti zraka te su zbog toga kutne brzine ploče manje, što je povoljno jer kuglica mora stalno biti u kontaktu s površinom ploče.

3.2. Proporcionalni pneumatski razvodnik

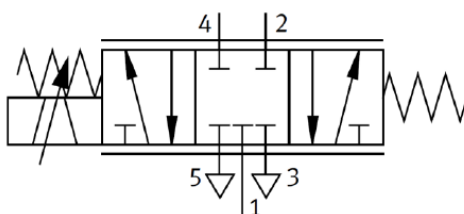
Za upravljanje pneumatskim mišićima koriste se dva proporcionalna pneumatska razvodnika [4] od kojih svaki upravlja jednim parom pneumatskih mišića. Odabrani su pneumatski razvodnici tvrtke Festo čije su karakteristike prikazane u sljedećoj tablici.

Tablica 2: Karakteristike proporcionalnog pneumatskog razvodnika [4]

Tip	MPYE-5-1/8 HF-010B
Upravljački signal	0-10 V
Napon u srednjem položaju	5 V
Radni medij	stlačeni zrak
Napajanje	24 V
Radni/Maksimalni tlak	0,6/1 MPa
Maksimalni protok	700 l/min
Maksimalna snaga	20 W
Ulazni električni otpor	70 kΩ

Proporcionalni pneumatski razvodnik kao upravljački signal koristi napon između 0 i 10 V, napon iznosa 5 V postavlja jednak tlak u oba pneumatska mišića te se u tom slučaju ploča nalazi u vodoravnom položaju [5]. Napon od 0 do 5 V zakreće ploču u smjeru kazaljke na satu, dok napon od 5 do 10 V zakreće ploču u suprotnom smjeru [5].

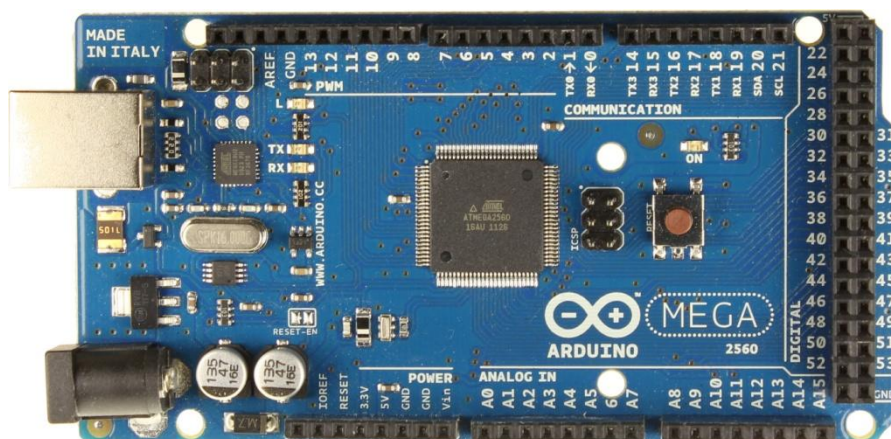
Princip rada proporcionalnog pneumatskog razvodnika je sljedeći; zavojnicom proporcionalnog pneumatskog razvodnika upravlja strujni signal koji je dobiven pretvaranjem naponskog signala u pojačalu integriranom u razvodnik. Zavojnica inducira magnetsko polje koje pokreće razvodni klip te kontrolira protok zraka.



Slika 12: Proporcionalni razvodnik 5/3

3.3. Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 [6] je programabilna platforma koja se bazira na ATmega 2560 čipu. Mikrokontroler raspolaže sa 16 ulaznih analognih pinova i 54 ulazno/izlaznih digitalnih pinova od kojih 15 može proizvesti širinsko-impulsno modulirani (engl. Pulse-Width modulation) signal. Valja napomenuti kako ovaj mikrokontroler raspolaže s 4 UART-a (engl. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) koji služe za prijenos podataka između paralelne i serijske veze. Bitna stavka je kako je to platforma otvorenog koda koja se temelji na C jeziku i razvojnoj okolini baziranoj na Processing-u koji je također otvorenog koda. Većina mikrokontrolera programira se pomoću programatora, Arduino mikrokontroleri su specifični jer se mogu programirati bez programatora što im omogućuje tzv. "bootloader" koji dolazi već instaliran (engl. firmware) na svakom Arduino mikrokontroleru. Arduino Mega 2560 ploče se programiraju preko USB-a provedenog preko USB serijskog čipa, u ovom slučaju radi se o čipu ATmega16U2 koji je programiran kao USB-serijski konverter. Arduino mikrokontroler vrlo je koristan i lako se implementira za što su zaslužni različiti dodatni moduli poznatiji kao štitovi (eng. Shield) koji se spajaju preko ulazno/izlaznih pinova na mikrokontroler te omogućuju primjerice jednostavnije upravljanje servomotorima, Ethernet i GSM komunikaciju s ostalim uređajima i još mnogo toga.



Slika 13: Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Na prethodnoj slici je vidljivo kako Arduino Mega 2560 mikrokontroler raspolaže s 54 ulazno/izlaznih digitalnih pinova, od kojih 15 može proizvesti širinsko-impulsno modulirani (eng. Pulse-Width modulation) signal. Širinsko-impulsno modulirani signal je bitan kod upravljanja proporcionalnim razvodnikom jer razvodnik radi na napon vrijednosti od 0 - 10 V. Arduino Mega 2560 posjeduje 5 V linearni naponski regulator s 16 MHz kristalnim oscilatorom zbog čega je potrebno koristiti digitalno pojačalo koje će povećati napon na 10 V potreban za rad proporcionalnog razvodnika.

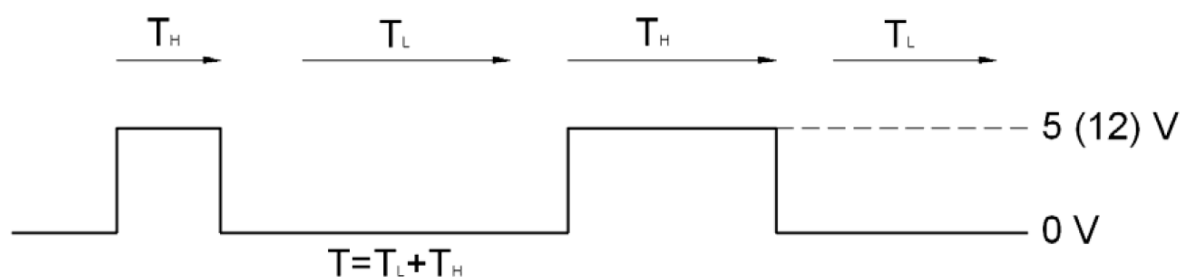
Tablica 3: Karakteristike Arduino Mega 2560 [6]

Radni napon	5 V
Preporučeni ulazni napon	7 - 12 V
Maksimalni ulazni napon	6 - 20 V
Digitalni ulazi/izlazi	54
Analogni ulazi	16
DC struja po pojedinačnom pinu	20 mA
DC struja na 3.3 V pinu	50 mA
Flash memorija	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Kristalni oscilator	16 MHz

3.3.1. Širinsko-impulsna modulacija signala

Širinsko-impulsna modulacija (engl. Pulse-Width modulation) signala ima široku primjenu, može se koristiti u industriji, vozilima, kod upravljanja servomotora, a kod ovog rada za upravljanje proporcionalnim razvodnikom. Također je prikladna za upravljanje analognih krugova, gdje može zamijeniti korištenje potenciometra ili regulatora napona.

Širinsko-impulsna modulacija signala je postupak kojim se analogni signal pretvara u digitalni. Period impulsa sastoji se od dva dijela; radnog dijela T_H (engl. on-time) i mirujućeg dijela T_L (engl. off-time). T_H se odnosi na vrijeme tijekom kojega signal ima konstantni iznos istosmjernog napona od +5 V (može biti i +12 V), dok se T_L odnosi na vrijeme tijekom kojega signal ima konstantni iznos istosmjernog napona 0 V [7].



Slika 14: Period PWM signala [7]

Potreba za korištenjem širinsko-impulsne modulacije signala javlja se zbog korištenja proporcionalnih pneumatskih razvodnika. Kako je već rečeno, razvodnici rade na naponu između 0 i 10 V te prema vrijednosti napona propuštaju zrak u pneumatski mišić.

Kako su kod digitalne logike poznati samo visoki (5 V) i niski (0 V) signali potrebno je taj signal pojačati na 10 V i prema prethodnoj slici podesiti vrijeme radnog T_H i mirujućeg T_L dijela tako da dozira pneumatski mišić potrebnom količinom zraka kako bi mišić kontrahirao na odgovarajuću duljinu.

4. MJERNE KOMPONENTE SUSTAVA

Kako bi bilo moguće regulirati sustav potrebno je imati dovoljno dobro mjerenje kuta nagiba ploče i pozicije kuglice. U tu svrhu se koristi troosni žiroskop i akcelerometar kako bi se dobila informacija o kutu nagiba ploče, a za dobivanje informacije odnosno koordinata pozicije kuglice koristi se zaslon osjetljiv na dodir.

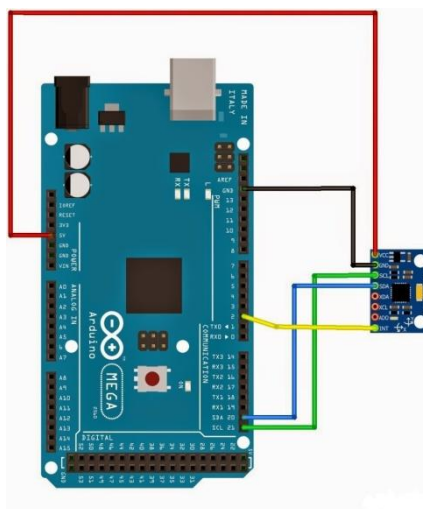
4.1. Žiroskop GY 521

Uređaj zadužen za mjerenje kuta nagiba ploče po kojoj se kotrlja kuglica je troosni žiroskop koji je ujedno i akcelerometar tvorničke oznake MPU 6050 [8] smješten na tiskanu pločicu tvorničke oznake GY 521.



Slika 15: Tiskana pločica žiroskopa

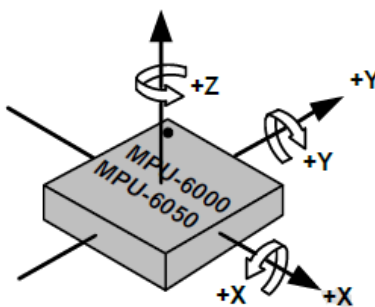
Na slici 16 prikazana je shema spajanja Arduino Mega 2560 mikrokontrolera i žiroskopa. Vidljivo je kako je za spajanje potrebno pet žica od kojih su po jedna spojena na napajanje mikrokontrolera iznosa 5 V i na uzemljenje (GND). Žica spojena na SCL pin odgovorna je za postavljanje kristalnog oscilatora, dok je žica spojena na SDA pin odgovorna za prijenos podataka. Posebno važna je žica spojena na INT pin čija kratica stoji za "Interrupt". Pomoću ovog pina se dobivaju očitavanja senzora. Ukoliko se ne bi koristio ovaj pin, bilo bi potrebno napisati program koji bi očitavao podatke sa senzora u trenutku kada se oni pojavljuju što bi znatno kompliciralo ostatak programa i nepotrebno opterećivalo mikrokontroler.



Slika 16: Shema spajanja Arduina i žiroskopa

4.1.1. Čip MPU 6050

Čip MPU 6050 služi za mjerenje kuta nagiba i kutne akceleracije te je kao takav prvi čip s integriranim troosnim žiroskopom i troosnim akcelerometrom na površini od samo 4x4x0,9 mm.



Slika 17: Čip MPU 6050 [8]

Žiroskop služi za dobivanje kutne brzine ploče po kojoj kotrlja kuglica. Integriranjem kutne brzine pomoću mikrokontrolera može se dobiti apsolutni kut nagiba. Integracijom se nakuplja greška te se nakon duljeg vremena dobiva kriva vrijednost kuta. Kako bi se to izbjeglo koristi se troosni akcelerometar koji se zajedno s žiroskopom nalazi na čipu. Pomoću akcelerometra se mjere iznosi ubrzanja u pojedinim osima.

4.2. Zaslون osjetljiv na dodir

Za dobivanje informacije odnosno koordinata pozicije kuglice koristi se zaslon osjetljiv na dodir.

Najčešće korišteni:

- Otporni
- Kapacitivni
- Površinski akustični valovi
- Infracrveni

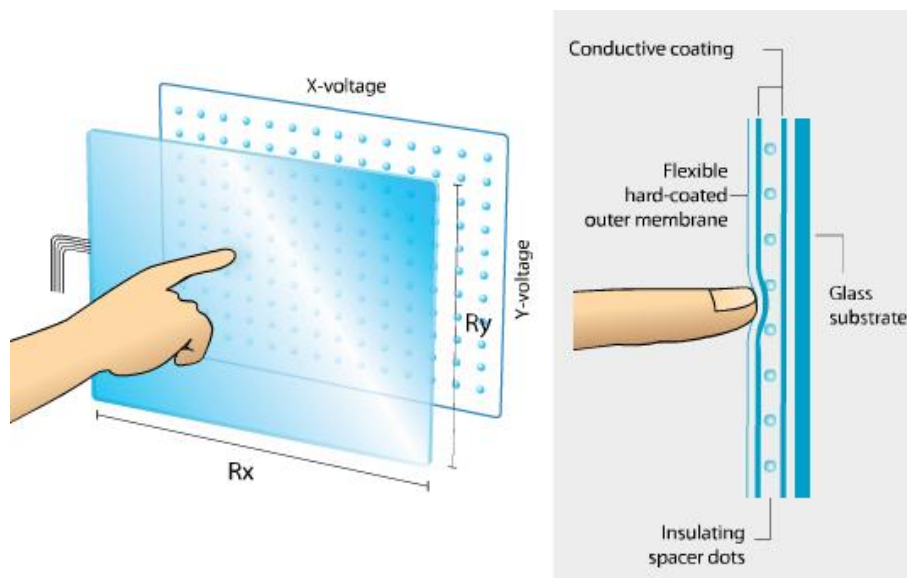
Kod ovog rada korišten je otporni zaslon osjetljiv na dodir (engl. resistive touch screen) kako bi mogao dobivati poziciju kuglice na ploči prilikom pritiska kojeg ostvaruje kuglica djelovanjem svoje mase na površinu zaslona.



Slika 18: Otporni zaslon osjetljiv na dodir

4.2.1. Princip rada

Zaslon osjetljiv na dodir koji koristi otpornu tehnologiju sastoji se dva sloja, gornji fleksibilni sloj napravljen od polietilena (PET) koji prihvaća na sebe pritisak i rigidni sloj napravljen od stakla. Oba sloja su obložena Indium Tin oksidom (ITO) kako bi im se pospješila električna vodljivost. Ova dva sloja odvaja sloj koji je izolator. Dok je zaslon osjetljiv na dodir spojen na istosmjerni izvor napajanja kroz oba sloja prolazi struja. Prilikom pritiska spaja se fleksibilni i rigidni sloj te nastaje promjena napona, odnosno djeliteľ napona u X i Y smjeru. Kontroler interpretira promjenu napona te računa na kojoj je poziciji nastala ista.



Slika 19: Princip rada otpornog zaslona osjetljivog na dodir

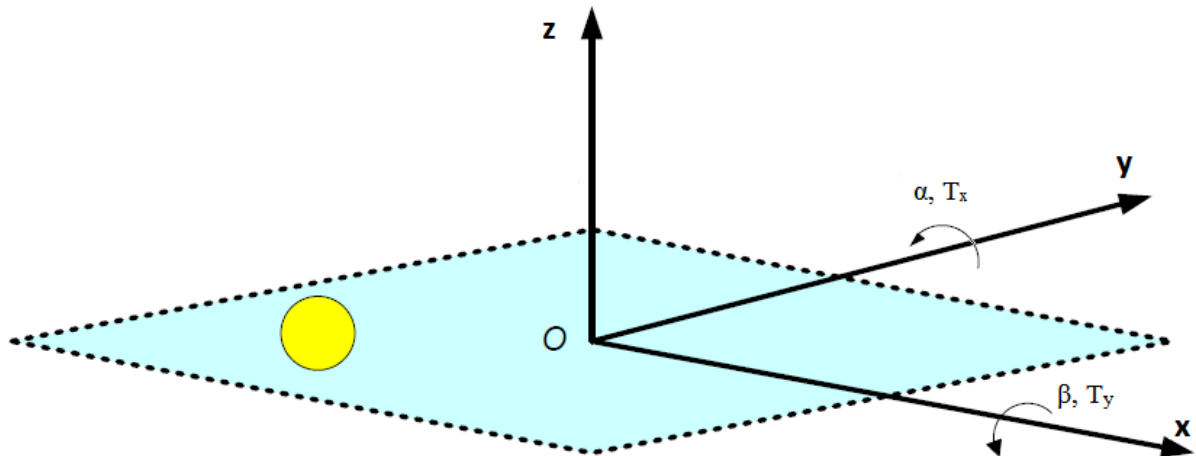
Tablica 4: Dimenzije zaslona

Dimenzija	Duljina	Širina
Eksterna	355,0 ± 0,5 mm	288,0 ± 0,5 mm
Vidljiva površina	341,5 ± 0,2 mm	275,0 ± 0,2 mm
Radna površina	337,0 ± 0,2 mm	269,0 ± 0,2 mm

Tablica 5: Karakteristike zaslona

Tvrdoća površine	3 H	Debljina stakla	1,8 mm
Optička bistroća	80 %	Radna sila pritiska	20 – 150 g
Radna temperatura	-10 – 60 °C	Debljina filma	0,188 mm
Operacijski ciklusi	>1 000 000	Šum signala	5 – 15 ms
Radni napon	DC 5 V	Radna struja	5 – 25 mA
Linearnost	1,50 %	Vlažnost	< 95 %
Oblik površine	svijetli	Otpor izolatora	20 MΩ @ DC 25 V

5. MATEMATIČKI MODEL



Slika 20: Koordinatni sustav kuglice na ploči

Kako bi mogli provesti simulaciju realnog modela sustava kuglice na ploči korištenjem računala, potrebno je izvesti matematičke jednadžbe koje dovoljno dobro opisuju ponašanje sustava.

Za ostvarenje tog zadatka koristit će se Euler-Lagrangeova metoda.

Euler-Lagrangeova ili energetska metoda temelji se na poznavanju kinetičke i potencijalne energije sustava u funkciji položaja i brzine generaliziranih koordinata.

Sila/moment u i -toj upravljanoj koordinati za pokretanje j -te mase iznosi prema [9]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_j}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K_j}{\partial q_i} + \frac{\partial P_j}{\partial q_i} = T_{ij} \quad (5.0)$$

gdje su:

- K_j – kinetička energija j -te mase
- P_j – potencijalna energija j -te mase
- q_i – i – ta upravljana koordinata
- \dot{q}_i – brzina i – te upravljane koordinate

Kinetička energija kuglice sastoji se od translacijske i rotacijske energije:

$$K_k = \frac{1}{2} m_k (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2) + \frac{1}{2} I_k (\omega_x^2 + \omega_y^2) \quad (5.1)$$

gdje su:

- m_k - masa kuglice
- I_k - moment inercije kuglice
- \dot{x}_k i \dot{y}_k – brzine translacije u smjeru osi x,y
- ω_x i ω_y - kutne brzine u smjeru osi x,y

Veza između kutne brzine i brzine translacije:

$$\dot{x}_k = r_k \omega_y \quad (5.2)$$

$$\dot{y}_k = r_k \omega_x$$

gdje je:

- r_k – radijus kuglice

Uvrštavanjem jednadžbi (5.2) u jednadžbu (5.1) dobivamo jednadžbu za ukupnu kinetičku energiju kuglice:

$$K_k = \frac{1}{2} \left[m_k (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2) + \frac{I_k}{r_k^2} (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2) \right] = \frac{1}{2} \left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2) \quad (5.3)$$

Nadalje postavljamo jednadžbu za kinetičku energiju ploče uz pretpostavku da je kuglica središte mase sa koordinatama (x_k, y_k) , a udaljena je od središta nepokretnog koordinatnog sustava za vektor položaja:

$$K_p = \frac{1}{2} I_k (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} (I_{px} \dot{\alpha}^2 + I_{py} \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} m_k (x_k^2 \dot{\alpha}^2 + 2x_k \dot{\alpha} y_k \dot{\beta} + y_k^2 \dot{\beta}^2) \quad (5.4)$$

gdje su:

- α i β – kutevi nagiba ploče uzduž osi x i y
- $\dot{\alpha}$ i $\dot{\beta}$ – kutne brzine

Ukupna kinetička energija cijelog sustava je zbroj kinetičke energije kuglice i ploče:

$$K = K_k + K_p$$

$$K = \frac{1}{2} \left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2) + \frac{1}{2} I_k (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} (I_{px} \dot{\alpha}^2 + I_{py} \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} m_k (x_k^2 \dot{\alpha}^2 + 2x_k \dot{\alpha} y_k \dot{\beta} + y_k^2 \dot{\beta}^2) \quad (5.5)$$

Potencijalna energija računa se s obzirom na relativan položaj kuglice u odnosu na horizontalnu os, tj. ovisno o kutu nagiba ploče u odnosu na horizontalnu os.

$$P_k = m_k g h = m_k g (x_k \sin \alpha + y_k \sin \beta) \quad (5.6)$$

gdje su:

- m_k - masa kuglice
- g - vektor gravitacijskog ubrzanja
- h - visina položaja težišta mase kuglice u odnosu prema nepokretnome koordinatom sustavu

Jednadžbe sustava:

$$L = K_k + K_p - P_k \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{\alpha}} = I_{px} \dot{\alpha}_x + I_k \dot{\alpha}_x + m_k x_k (x_k \dot{\alpha} + y_k \dot{\beta}) \quad \frac{\partial P}{\partial \alpha} = mg \cos \alpha \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{\beta}} = I_{py} \dot{\beta}_x + I_k \dot{\beta}_x + m_k y_k (y_k \dot{\beta} + x_k \dot{\alpha}) \quad \frac{\partial P}{\partial \beta} = mg \cos \beta \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_k} = \left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) \dot{x}_k \quad \frac{\partial P}{\partial x_k} = m_k (x_k \dot{\alpha} + y_k \dot{\beta}) \dot{\alpha} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{y}_k} = \left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) \dot{y}_k \quad \frac{\partial P}{\partial y_k} = m_k (x_k \dot{\alpha} + y_k \dot{\beta}) \dot{\beta} \quad (5.11)$$

Jednadžbe za okretno momente:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial P}{\partial \alpha} &= (I_{px} + I_k) \ddot{\alpha} + m_k x_k^2 \ddot{\alpha} + 2m_k x_k \dot{x}_k \dot{\alpha} + m_k x_k y_k \ddot{\alpha} + \\ & m_k \dot{x}_k y_k \dot{\beta} + m_k x_k \dot{y}_k \dot{\beta} - m_k g \cos \alpha = \tau_x \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial P}{\partial \beta} &= (I_{py} + I_k) \ddot{\beta} + m_k y_k^2 \ddot{\beta} + 2m_k y_k \dot{y}_k \dot{\beta} + m_k x_k y_k \ddot{\beta} + \\ & m_k \dot{y}_k x_k \dot{\alpha} + m_k y_k \dot{x}_k \dot{\alpha} - m_k g \cos \beta = \tau_y \end{aligned} \quad (5.13)$$

Nelinearne diferencijalne jednadžbe sustava kuglice na ploči:

$$\left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) \ddot{x}_k - m_k (x_k \dot{\alpha}^2 + y_k \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_k g \sin \alpha = 0 \quad (5.14)$$

$$\left(m_k + \frac{I_k}{r_k^2} \right) \ddot{y}_k - m_k (y_k \dot{\beta}^2 + x_k \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_k g \sin \beta = 0 \quad (5.15)$$

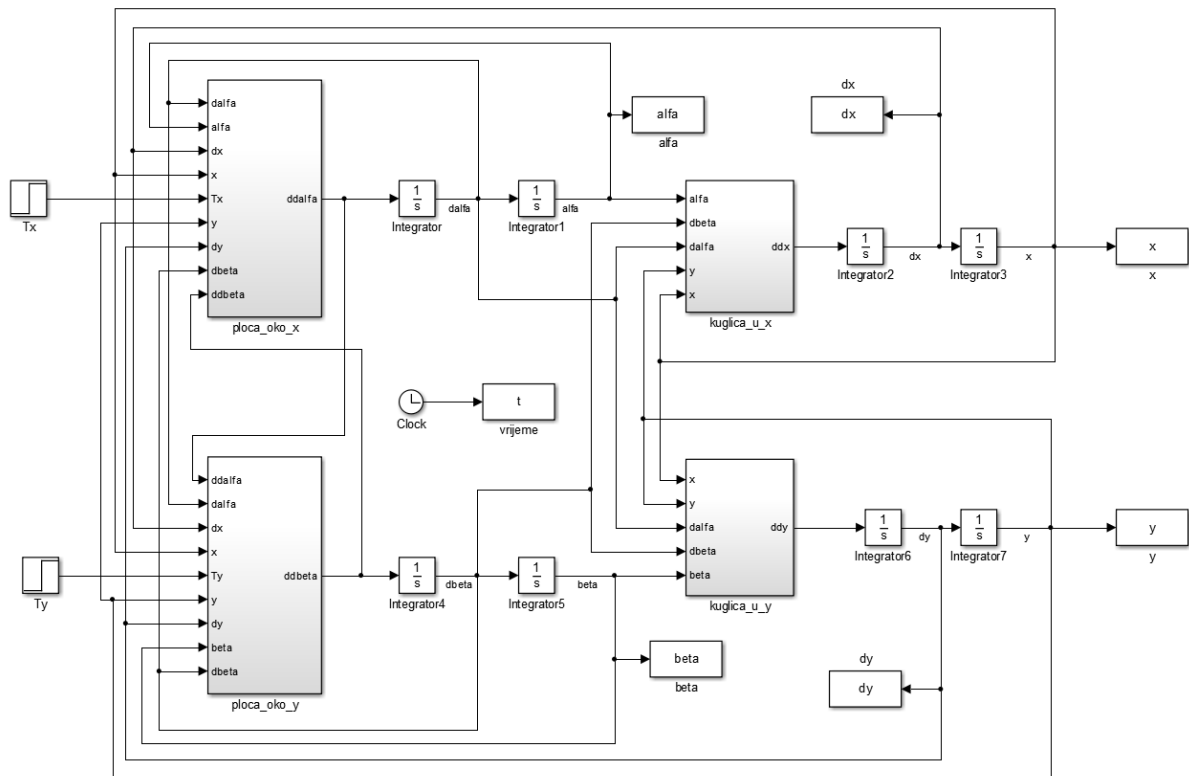
Jednadžbe za okretni moment:

$$\tau_x = (I_{px} + I_k + m_k x_k^2) \ddot{\alpha} + 2m_k x_k \dot{x}_k \dot{\alpha} + m_k x_k y_k \ddot{\beta} + m_k \dot{x}_k y_k \dot{\beta} + m_k x_k \dot{y}_k \dot{\beta} + m_k g x_k \cos \alpha \quad (5.16)$$

$$\tau_y = (I_{py} + I_k + m_k y_k^2) \ddot{\beta} + 2m_k y_k \dot{y}_k \dot{\beta} + m_k y_k x_k \ddot{\alpha} + m_k \dot{y}_k x_k \dot{\alpha} + m_k x_k \dot{y}_k \dot{\alpha} + m_k g y_k \cos \beta \quad (5.17)$$

Kod jednadžbi za okretnne momente ploče dodani su momenti τ_x i τ_y zato jer, za razliku od kuglice na koju ne djeluju nikakve vanjske sile, pločom se upravlja pomoću momenata proizvedenim preko pneumatskih mišića.

Iz prethodnih jednadžbi izveden je nelinearni matematički model sustava prikazan na slici ispod.

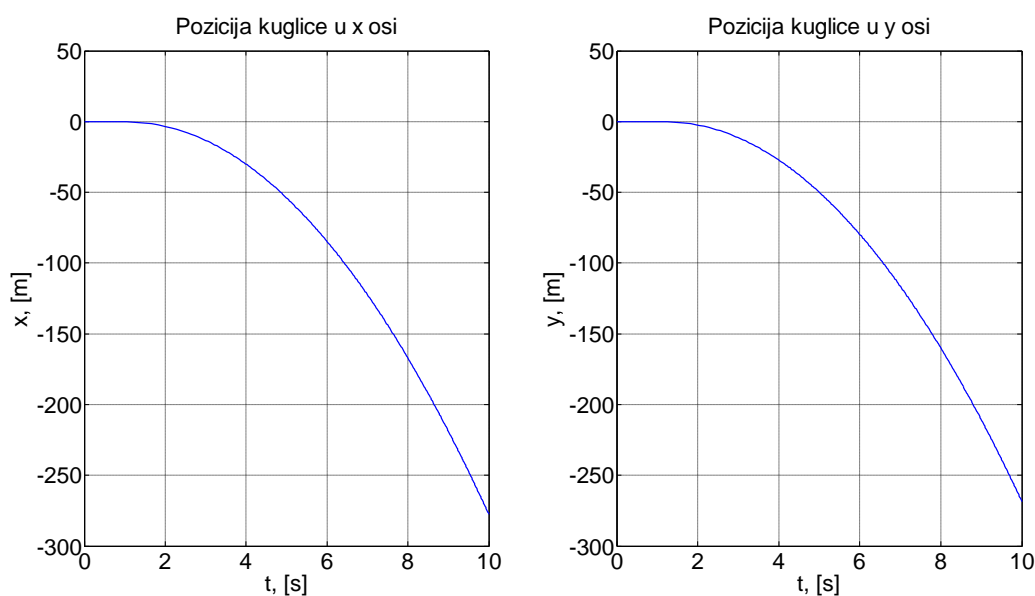


Slika 21: Blok dijagram nelinearnog modela

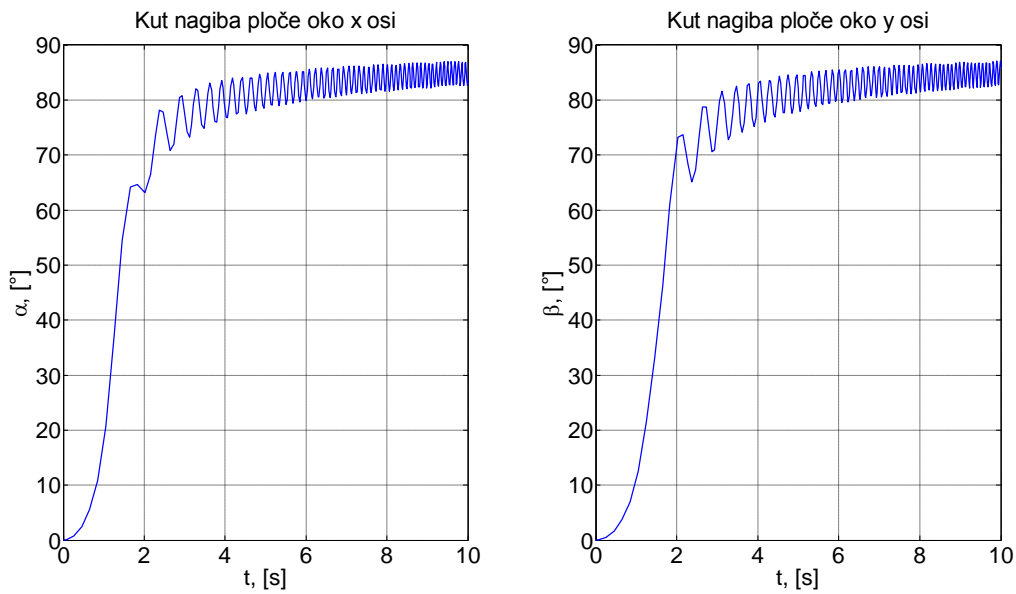
Tablica 6: Parametri sustava kuglice na ploči

PARAMETAR	OPIS PARAMETRA	VRIJEDNOST
m_k	masa kuglice	0,06 kg
m_p	masa ploče	2,59 kg
I_k	moment inercije kuglice	$4,056 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
I_{px}	moment inercije ploče u smjeru osi x	$0,024 \text{ kgm}^2$
I_{py}	moment inercije ploče u smjeru osi y	$0,035 \text{ kgm}^2$
r_k	polumjer kuglice	0,013 m
A_p	površina ploče	$0,1 \text{ m}^2$
g	gravitacijska akceleracija	9.81 m/s^2

U svrhu provjere ispravnosti matematičkog modela napravljena je simulacija sustava bez regulatora sa zadanim parametrima sustava temeljenim na fizičkim parametrima nastavne makete.



Slika 22: Provjera ispravnosti nelinearnog modela pozicije kuglice za nulte početne uvjete



Slika 23: Provjera ispravnosti nelinearnog modela kuta nagiba ploče za nulte početne uvjete

Na prethodnim slikama je prikazan odziv sustava za iznose okretnih momenata τ_x i τ_y od 0,01 Nm i nultim početnim uvjetima. Kutovi nagiba ploče i pozicija kuglice se povećavaju zbog stalnog djelovanja okretnih momenata.

5.1. Linearizacija modela

U svrhu projektiranja PID regulatora potrebno je izvršiti linearizaciju matematičkog modela.

Uvrštavajući moment inercije kuglice $I_k = \frac{2}{5}m_k r_k^2$ u jednažbe (5.14) i (5.15) dobivamo:

$$m_k \left[\frac{5}{7} \ddot{x}_k - (x_k \dot{\alpha}^2 + y_k \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \alpha \right] = 0 \quad (5.18)$$

$$m_k \left[\frac{5}{7} \ddot{y}_k - (y_k \dot{\beta}^2 + x_k \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \beta \right] = 0 \quad (5.19)$$

Model je moguće linearizirati uz sljedeće pretpostavke:

- mali kut nagiba ploče (do $\pm 5^\circ$):

$$\alpha \ll 1 \text{ i } \beta \ll 1$$

$$\sin \alpha \cong \alpha, \sin \beta \cong \beta$$

$$\cos \alpha \cong 1, \cos \beta \cong 1$$

- mali stupanj promjene nagiba ploče i pomaka kuglice:

$$\dot{\alpha} \ll 1 \text{ i } \dot{\beta} \ll 1$$

$$\dot{\alpha}\dot{\beta} \cong 0, \dot{\alpha}^2 \cong \dot{\beta}^2 \cong 0$$

$$x_k^2 \cong y_k^2 \cong x_k y_k \cong 0$$

$$\alpha x_k \cong \beta y_k \cong 0$$

Linearizirane jednadžbe uz pretpostavku da je moment inercije ploče

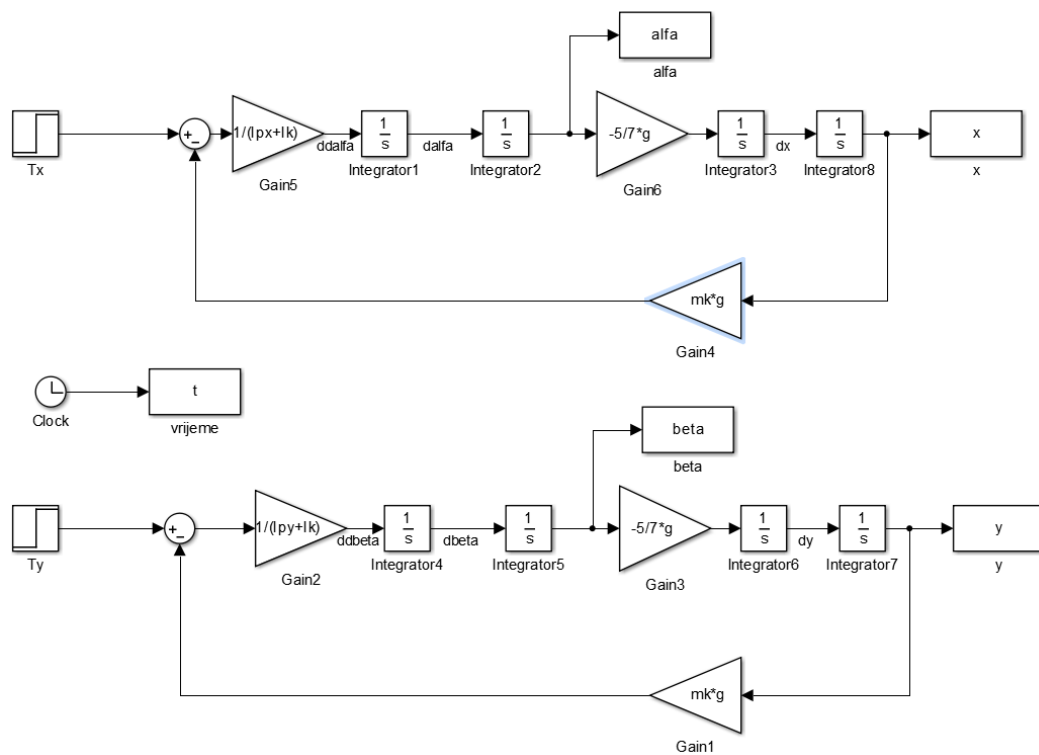
$I_p = \frac{1}{12} m_p (a^2 + b^2)$, a moment inercije kuglice $I_k = \frac{2}{5} m_k r_k^2$ glase:

$$\ddot{x}_k = -\frac{5}{7} g \alpha \quad (5.20)$$

$$\ddot{y}_k = -\frac{5}{7} g \beta \quad (5.21)$$

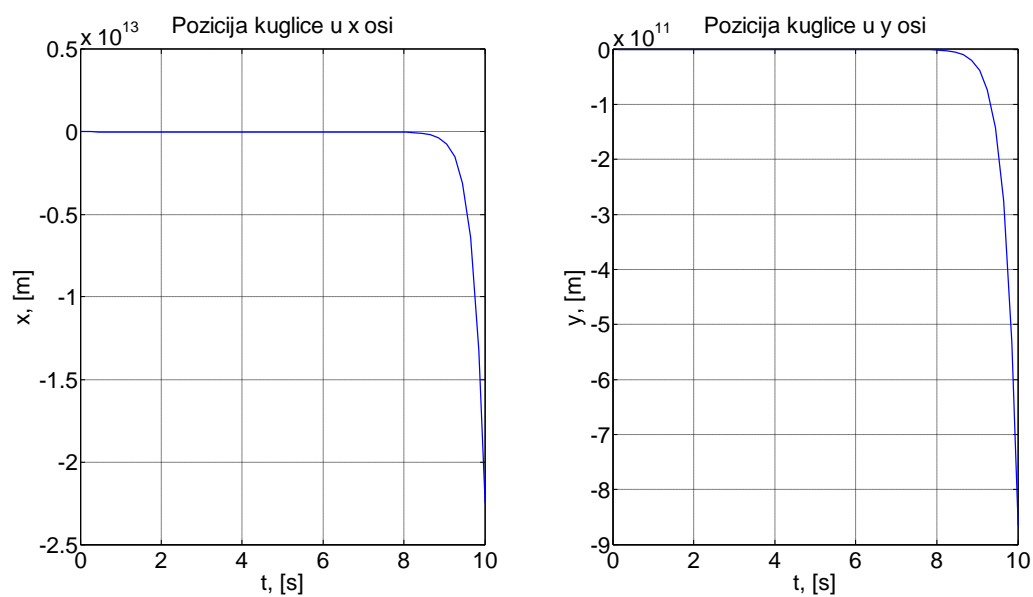
$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{I_{px} + I_k} (T_x - m_k g x_k) \quad (5.22)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{I_{py} + I_k} (T_y - m_k g y_k) \quad (5.23)$$

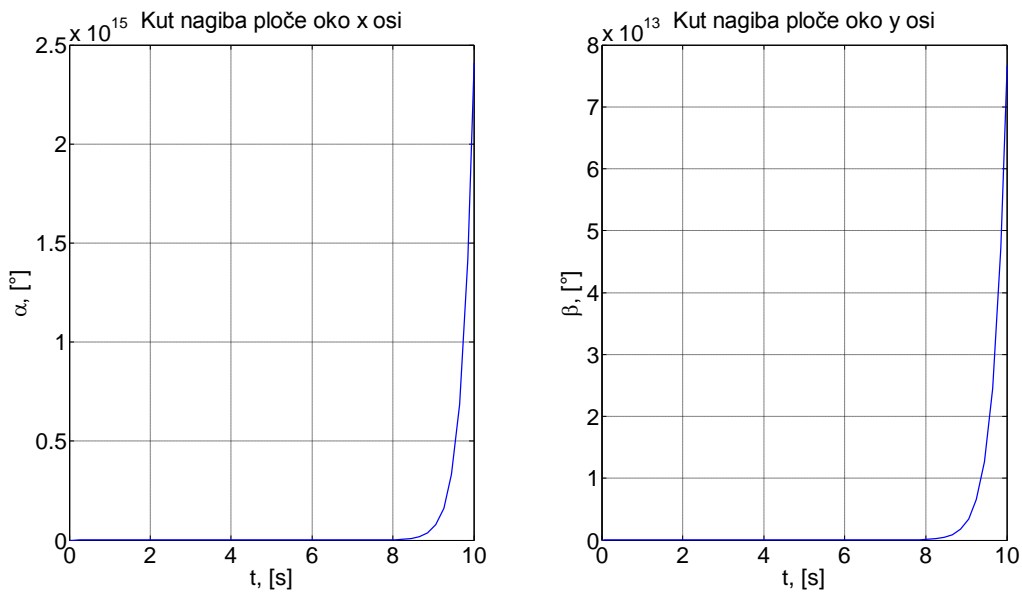


Slika 24: Blok dijagram lineariziranog modela

Nakon što je izvršen postupak linearizacije matematičkog modela napravljena je simulacija koja prikazuje ispravnost istog.



Slika 25: Provjera ispravnosti lineariziranog modela pozicije kuglice za nulte početne uvjete



Slika 26: Provjera ispravnosti lineariziranog modela kuta nagiba ploče za nulte početne uvjete

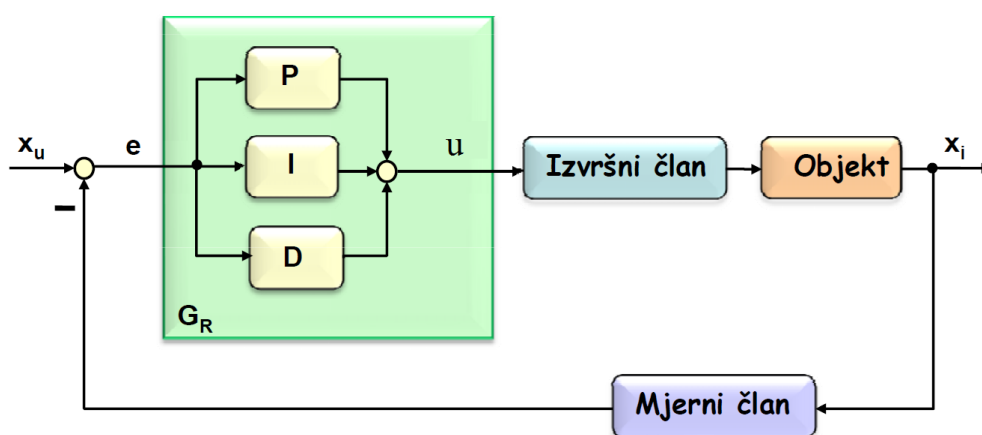
Kao što je prikazano na prethodnim slikama, ispravnost matematičkog modela je ispitana s nultim početnim uvjetima i okretnim momentima τ_x i τ_y iznosa 0,01 Nm. Ponašanje sustava je slično onome nelinearnog modela sa slike 21 i 22, ali nije u potpunosti isto kada odziv izađe iz okvira u kojima je provedena linearizacija jer tada nema utjecaja nelinearnih članova koji su izostavljeni linearizacijom.

6. SINTEZA REGULATORA I SIMULACIJA SUSTAVA

Za regulaciju kuta nagiba ploče i pozicije kuglice na ploči odabrana su dva PID regulatora u kaskadnoj strukturi.

6.1. PID regulator

Na slici 27 prikazan je regulacijski krug s paralelnom strukturom PID regulatora.



Slika 27: Blok-shema regulacijskog kruga s PID regulatorom [10]

PID regulator sastoji se od tri djelovanja, P, I i D koja zajedno daju ulaznu veličinu $u(t)$ u sustav prema sljedećoj jednadžbi.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.1)$$

PID regulator kontinuirano računa upravljačku veličinu $u(t)$ iz pogreške $e(t)$, razlike nazivne veličine $x_u(t)$ i regulirane veličine $x_i(t)$. Često je u raznim procesima potrebno samo jedno od triju djelovanja PID regulatora.

P djelovanje daje izlaznu vrijednost koja je proporcionalna trenutnoj vrijednosti pogreške. Ukoliko je P djelovanje preveliko, sustav može postati nestabilan. Ukoliko je P djelovanje premalo, a pogreška velika, regulator može biti prespor ili nedovoljno osjetljiv na pogrešku.

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (6.2)$$

I djelovanje je suma svih grešaka tijekom vremena trajanja procesa. Ono ubrzava proces ka željenoj veličini i uklanja regulacijsko odstupanje. Nedostatak I djelovanja je što može uzrokovati prebačaj.

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6.3)$$

D djelovanje predviđa ponašanje sustava te tako smanjuje vrijeme smirivanja i poboljšava stabilnost sustava. Uglavnom se koristi s niskopropusnim filtrom jer je veoma osjetljivo na šum.

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.4)$$

Najčešće vrste regulatora temeljene na P, I i D djelovanju su P, PI, PD, PID.

6.2. Optimum dvostrukog odnosa

U svrhu sinteze PID regulatora koristio se postupak optimuma dvostrukog odnosa [11].

Optimum dvostrukog odnosa nastao je s namjerom da se pronađe algebarska veza između koeficijenta prijenosne funkcije linearnog sustava proizvoljnog reda, takav da sustav ima optimalno prigušenje koje odgovara prigušenju $\zeta=0,707$ oscilatornog člana drugog reda.

Prijenosna funkcija oscilatornog člana drugog reda bez nula:

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \quad (6.5)$$

Koristeći kriterij optimuma dvostrukog odnosa može se odrediti optimalan odziv sustava u odnosu na prijenosnu funkciju zatvorenog regulacijskog kruga.

Prijenosna funkcija zatvorenog sustava drugog reda bez nula prema optimumu dvostrukog odnosa:

$$G_{odo}(s) = \frac{1}{A(s)} = \frac{1}{1 + T_e s + D_2 T_e^2 s^2} \quad (6.6)$$

Postupak se zasniva na izjednačavanju karakterističnog polinoma prijenosne funkcije regulacijskog kruga s karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa $A(s)$. Postavljanjem svih karakterističnih odnosa na optimalni iznos 0,5 ($D_2=D_3=D_n=0,5$) postiže se kvazi-aperiodski odziv regulacijskog kruga sa 6% nadvišenja u odzivu te vremenom porasta $t_{100\%} \approx 1,8T_e$ [11].

Prema funkciji zatvorenog sustava drugog reda prikazanoj iznad, može se proširiti funkcija za sustave višeg reda.

Prijenosna funkcija zatvorenog sustava bez nula prema optimumu dvostrukog odnosa:

$$G_{odo}(s) = \frac{1}{A(s)} \quad (6.7)$$

$$= \frac{1}{1 + T_e s + D_2 T_e^2 s^2 + \dots + D_2^{n-2} T_e^{n-1} s^{n-1} \dots D_{n-1} D_{n-2}^2 + D_2^{n-1} T_e^n s^n \dots D_n D_{n-1}^2}$$

gdje je:

n – red sustava

T_e – ekvivalentna vremenska konstanta

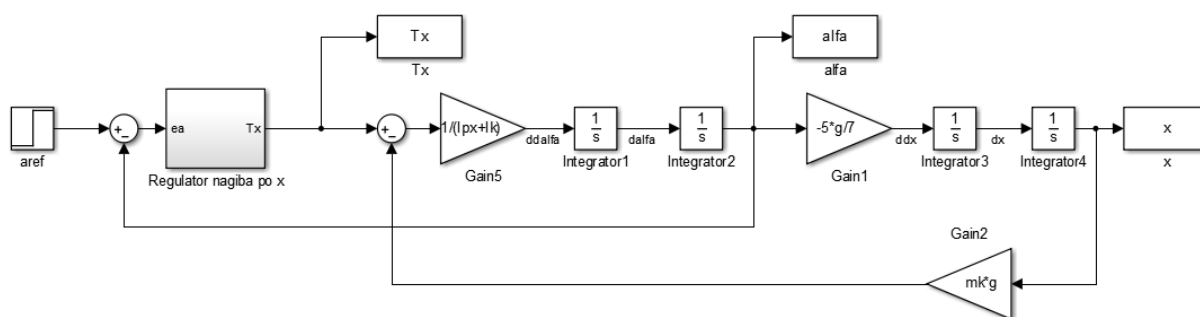
D_i – karakteristični odnosi ($i=2, 3, \dots, n$)

6.3. Regulacija sustava

Prvo je izvršena regulacija lineariziranog matematičkog modela, zatim su nakon toga parametri regulatora preneseni na nelinearni matematički model koji će raditi oko točke u kojoj je provedena linearizacija.

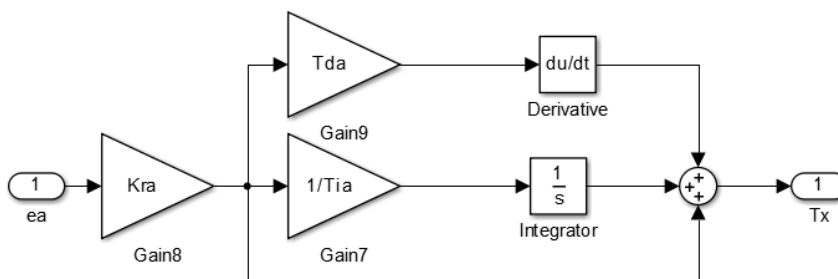
6.3.1. Regulacija nagiba ploče lineariziranog matematičkog modela

Najprije je napravljena regulacija nagiba ploče po x i y osi. Postupak je prikazan za samo jednu os jer je za drugu os identičan.



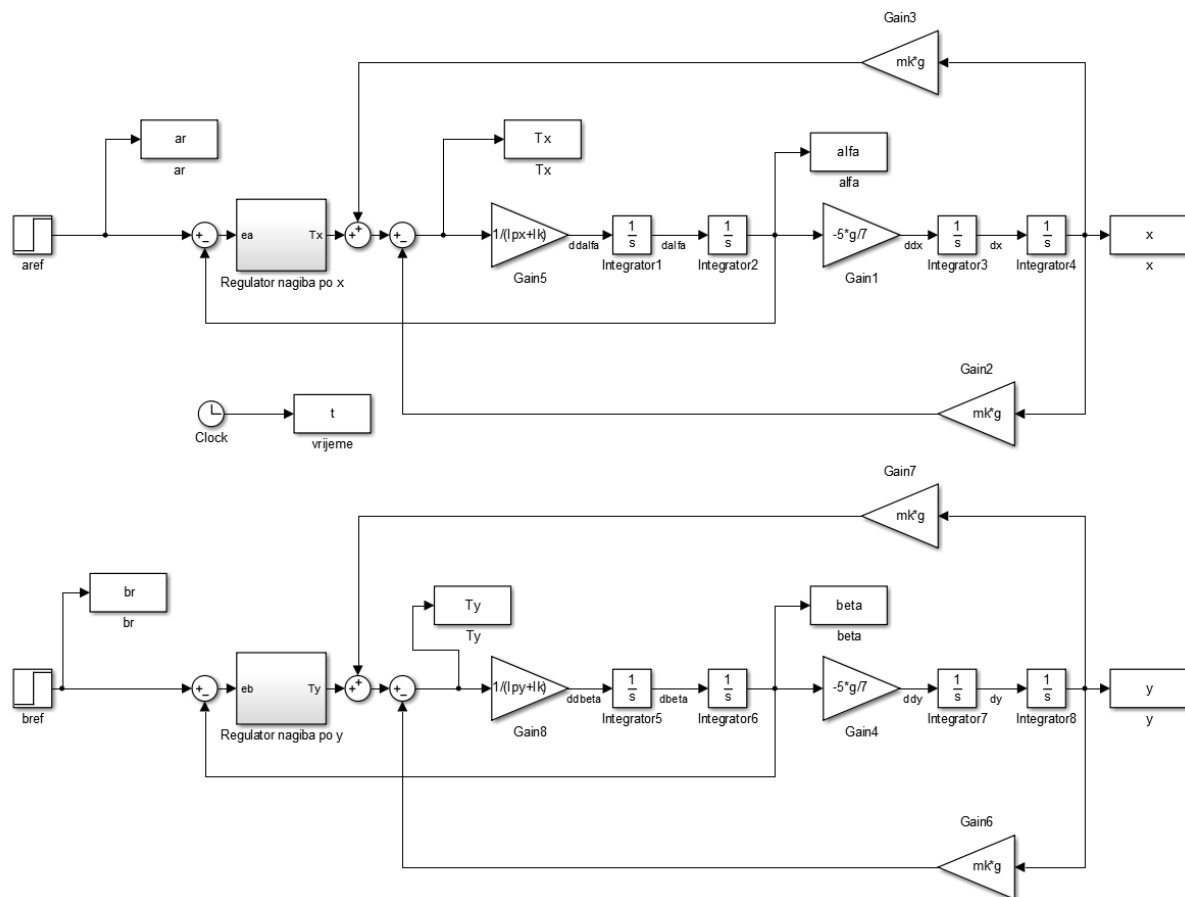
Slika 28: Regulacijski krug kuta nagiba ploče

Na slici 28 je prikazan regulacijski krug kuta nagiba ploče prema jednadžbi (5.22) s regulatorom prikazanim na slici 29.



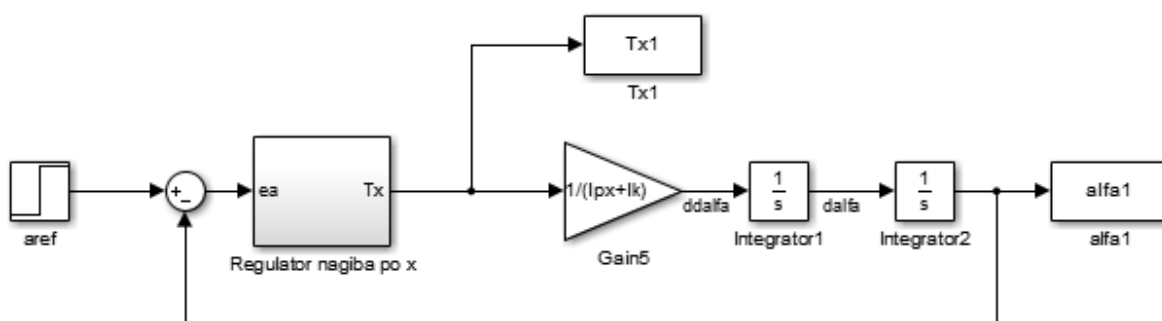
Slika 29: Regulator kuta nagiba ploče

Kako bi se ubrzao odziv sustava i kompenzirao utjecaj povratnog djelovanja momenta kojeg stvara masa kuglice na ploču regulacijski krug je proširen kompenzatorom djelovanja iste prikazano na slici 30.



Slika 30: Regulacijski krug kuta nagiba ploče s kompenzacijom poremećaja momenta

PID regulator se projektira uz pretpostavku da se moment kojeg stvara kuglica na ploču smatra vanjskim poremećajem kojeg će kompenzirati kompenzator ako se radi o brzim promjenama uzrokovanim promjenom pozicije kuglice na ploči ili sam PID regulator ako se radi o sporim promjenama.



Slika 31: Regulacijski krug nagiba ploče na kojem se temelji sinteza PID regulatora

Za sintezu regulatora koristi se optimum dvostrukog odnosa koji se temelji na izjednačavanju karakterističnog polinoma prijenosne funkcije regulacijskog kruga s karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa.

Prijenosna funkcija regulacijskog kruga nagiba ploče prema slici 31 ima sljedeći oblik:

$$G_{z\alpha} = \frac{T_{d\alpha} T_{i\alpha} s^2 + T_{i\alpha} s + 1}{\frac{(I_k + I_p) T_{i\alpha}}{K_{r\alpha}} s^3 + T_{d\alpha} T_{i\alpha} s^2 + T_{i\alpha} s + 1} \quad (6.8)$$

Karakteristični polinom prema optimumu dvostrukog odnosa:

$$A(s) = 1 + T_{e\alpha} s + D_{2\alpha} T_{e\alpha}^2 s^2 + D_{2\alpha}^2 D_{3\alpha} T_{e\alpha}^3 s^3 \quad (6.9)$$

Postavljanjem svih karakterističnih odnosa na optimalni iznos 0,5 ($D_2=D_3=D_n=0,5$) postiže se kvazi-aperiodski odziv regulacijskog kruga sa 6% nadvišenja u odzivu te vremenom porasta $t_{100\%} \approx 1,8 T_e$.

Prema optimumu dvostrukog odnosa parametri regulatora nagiba ploče oko osi x glase:

$$D_{i\alpha} = 0,5$$

$$T_{e\alpha} = 0,05$$

$$K_{r\alpha} = \frac{(I_{px} + I_k)}{D_{i\alpha}^3 T_{e\alpha}^2} = 76,813$$

$$T_{d\alpha} = D_{i\alpha} T_{e\alpha} = 0,025$$

$$T_{i\alpha} = T_{e\alpha} = 0,05$$

Sinteza regulatora nagiba ploče oko osi y radi se prema istom principu kao za os x.

Parametri regulatora nagiba ploče oko osi y:

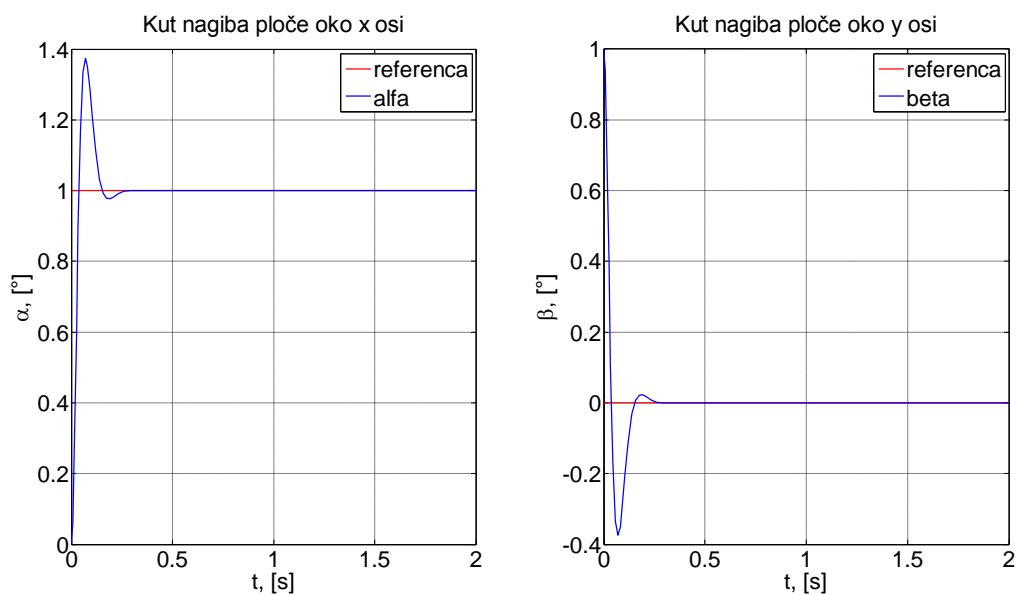
$$D_{i\beta} = 0,5$$

$$T_{e\beta} = 0,06$$

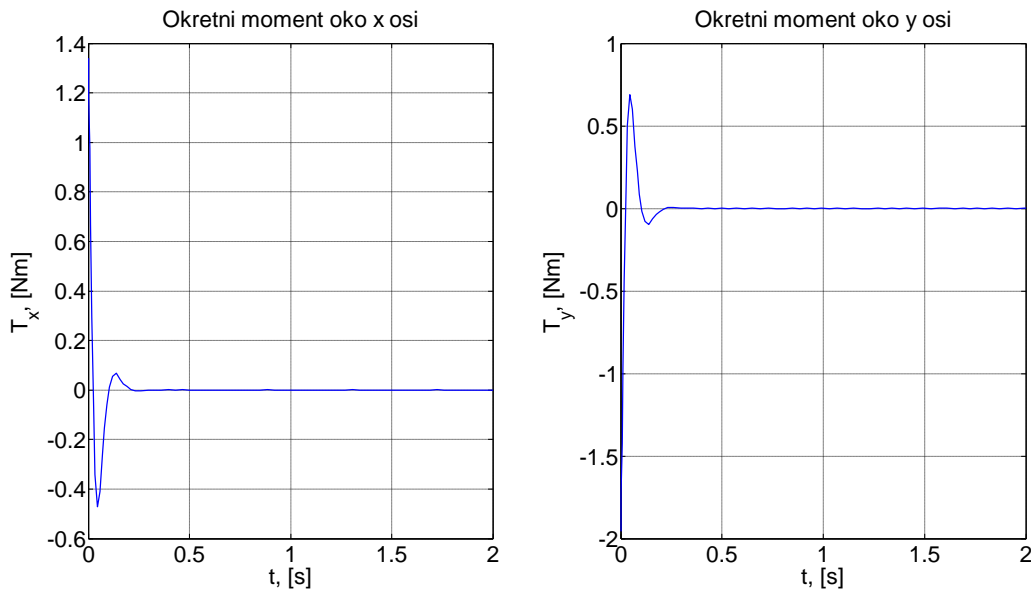
$$K_{r\beta} = 77,7868$$

$$T_{d\beta} = 0,03$$

$$T_{i\beta} = 0,06$$



Slika 32: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče bez prefiltra, odziv kuta nagiba ploče



Slika 33: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče bez prefiltra, odziv okretnih momenata

Parametri simulacije:

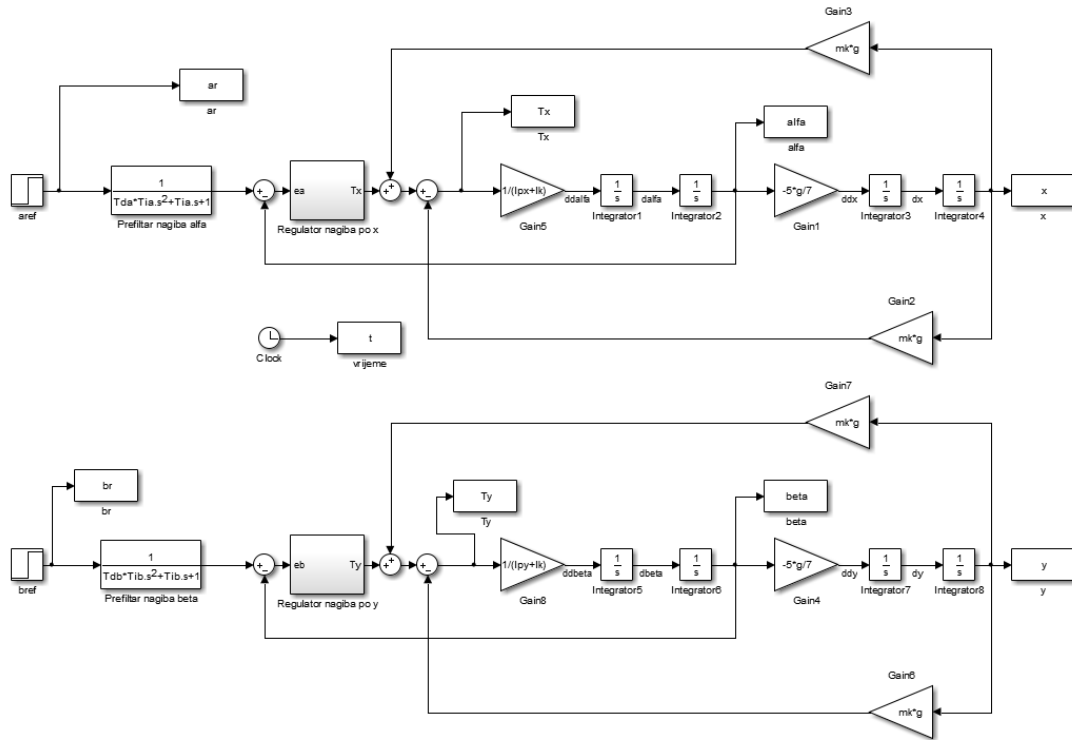
$$\alpha_0 = 0^\circ, \quad \beta_0 = 1^\circ$$

$$\alpha_{ref} = 1^\circ, \quad \beta_{ref} = 0^\circ$$

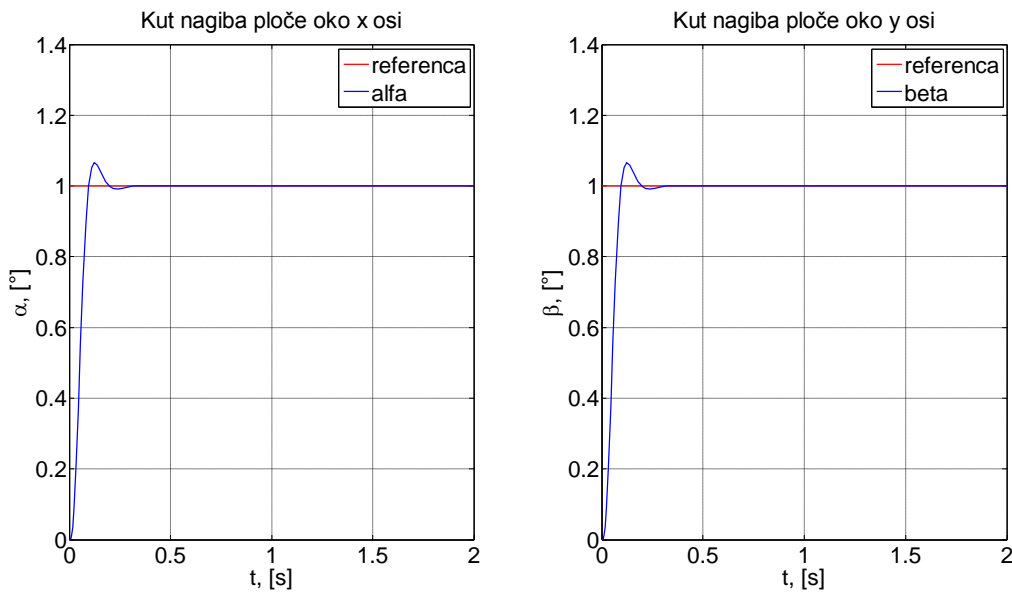
Na slici 32 je vidljivo nadvišenje odziva kuta nagiba ploče čiji je uzrok derivirajuće djelovanje nule u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga u jednadžbi (6.8).

Kako bi se eliminiralo derivirajuće djelovanje, u granu reference kuta nagiba ploče dodaje se prefilter drugog reda (PT₂ član) čija prijenosna funkcija glasi:

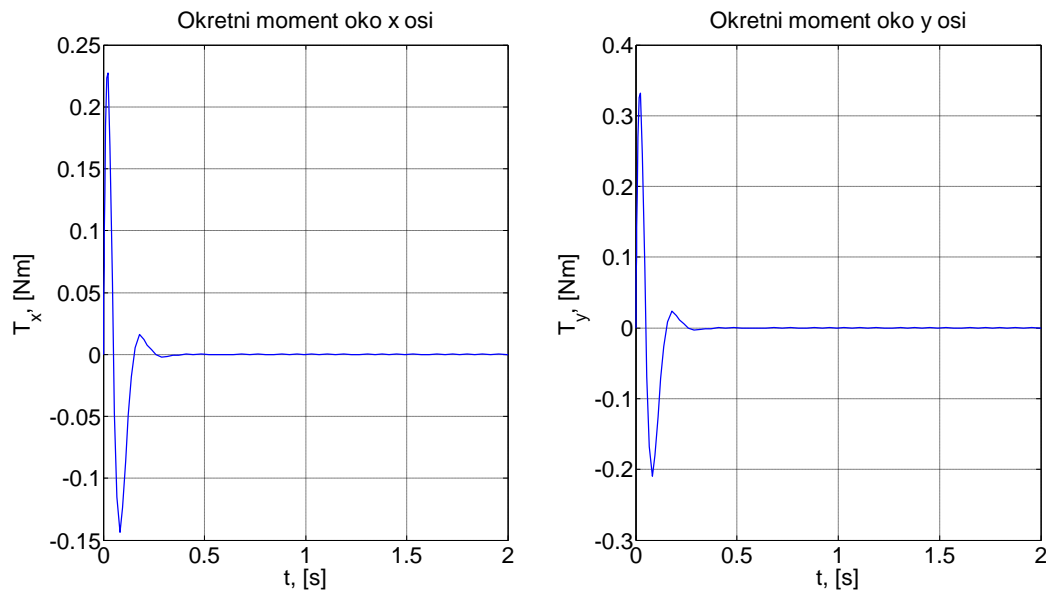
$$G_{pf\alpha} = \frac{1}{T_{d\alpha} T_{i\alpha} s^2 + T_{i\alpha} s + 1} \quad (6.10)$$



Slika 34: Regulacijski krug kuta nagiba ploče s prefiltrom



Slika 35: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče s prefiltrom, odziv kuta nagiba ploče



Slika 36: Rezultati simulacije regulacijskog kruga kuta nagiba ploče s prefiltrom, odziv okretnih momenata

Parametri simulacije:

$$\alpha_0 = 0^\circ, \quad \beta_0 = 0^\circ$$

$$\alpha_{ref} = 1^\circ, \quad \beta_{ref} = 1^\circ$$

6.3.2. Regulacijski krug pozicije kuglice lineariziranog matematičkog modela

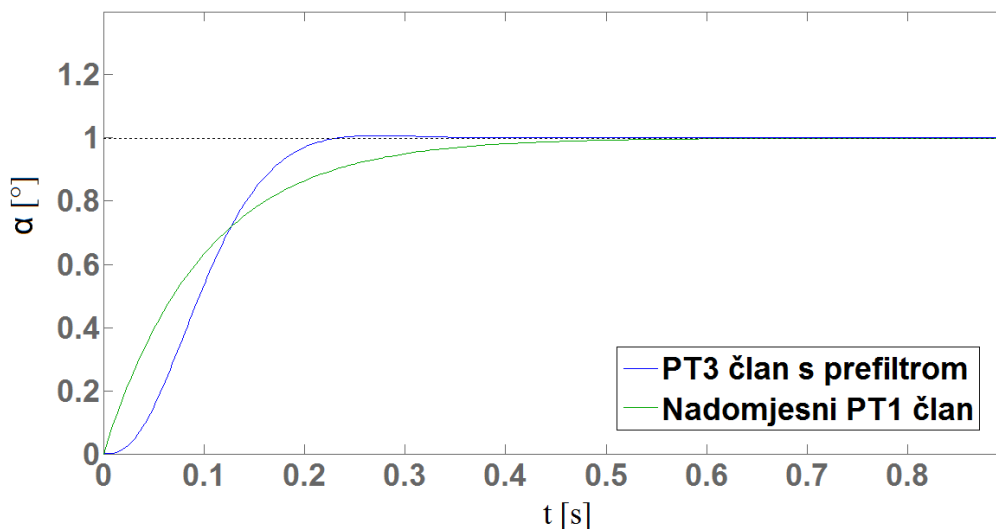
Ponašanje regulacijskog kruga nagiba ploče opisuje se nadomjesnim PT₃ članom:

$$G_{z\alpha}(s) = \frac{\alpha}{\alpha_r} = \frac{1}{1 + T_{e\alpha}s + D_{2\alpha}T_{e\alpha}^2s^2 + D_{2\alpha}^2D_{3\alpha}T_{e\alpha}^3s^3} \quad (6.11)$$

Regulator nagiba ploče podešen je za kvazi-aperiodski odziv, ponašanje regulacijskog kruga nagiba ploče može se aproksimirati proporcionalnim članom prvog reda (PT₁ članom):

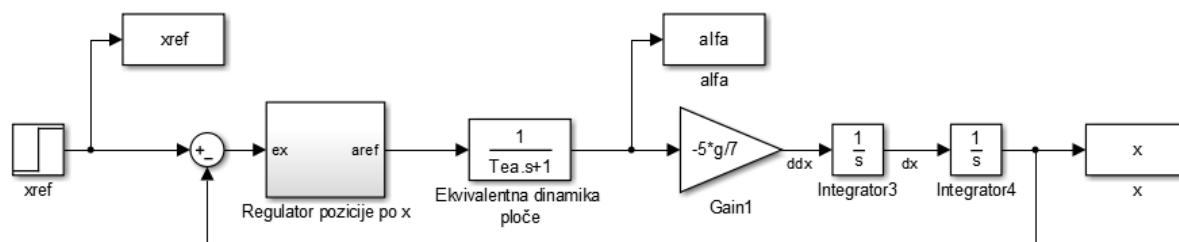
$$G_{e\alpha}(s) = \frac{1}{1 + T_{e\alpha}s + D_{2\alpha}T_{e\alpha}^2s^2 + D_{2\alpha}^2D_{3\alpha}T_{e\alpha}^3s^3} \approx \frac{1}{1 + T_{e\alpha}s} \quad (6.12)$$

Nadomjesni PT_1 član ima sličnu brzinu odziva i vrijeme smirivanja kao i složeniji PT_3 član podešen za optimalno prigušenje.

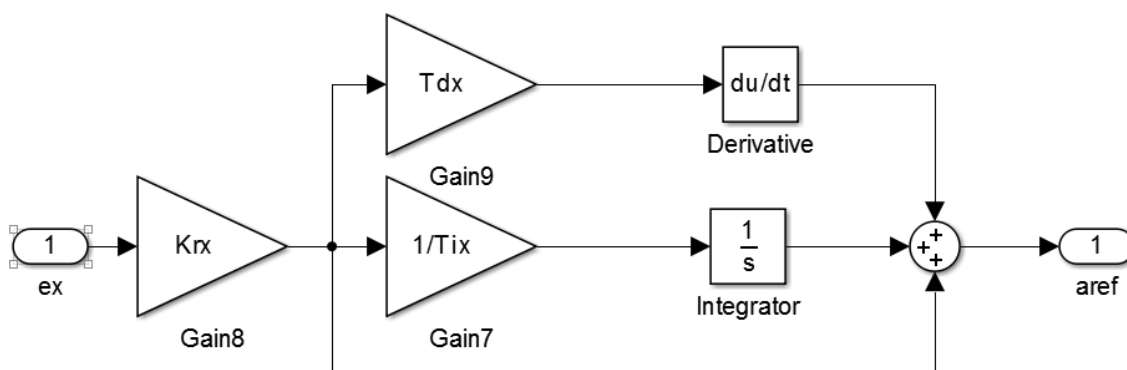


Slika 37: Odziv PT_3 člana podešenog za optimalno prigušenje i nadomjesnog PT_1 člana

Na slici 38 prikazan je regulacijski krug pozicije kuglice s podređenim ekvivalentnim krugom dinamike ploče koji se koristi za sintezu regulatora pozicije kuglice.



Slika 38: Regulacijski krug pozicije kuglice s podređenim ekvivalentnim krugom dinamike ploče



Slika 39: Regulator pozicije kuglice

Parametri PID regulatora pozicije kuglice na ploči dobivaju se primjenom optimuma dvostrukog odnosa na prijenosnu funkciju zatvorenog kruga pozicije kuglice prema slici 38:

$$G_{zx} = \frac{T_{dx} T_{ix} s^2 + T_{ix} s + 1}{-\frac{7 T_{e\alpha} T_{ix}}{5 K_{rx} g} s^4 - \frac{7 T_{ix}}{5 K_{rx} g} s^3 + T_{dx} T_{ix} s^2 + T_{ix} s + 1} \quad (6.13)$$

Karakteristični polinom prijenosne funkcije zatvorenog regulacijskog kruga pozicije kuglice izjednačuje se s karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa:

$$A(s) = 1 + T_{ex} s + D_{2x} T_{ex}^2 s^2 + D_{2x}^2 D_{3x} T_{ex}^3 s^3 + D_{2x}^3 D_{3x}^2 D_{4x} T_{ex}^4 s^4 \quad (6.14)$$

Parametri PID regulatora pozicije kuglice po osi x:

$$D_{ix} = 0,5$$

$$T_{ex} = \frac{T_{e\alpha}}{D_{ix}^3} = 0,4$$

$$K_{rx} = -\frac{7 D_{ix}^3}{5 g T_{e\alpha}^2} = -7,1356$$

$$T_{dx} = \frac{T_{e\alpha}}{D_{ix}^2} = 0,2$$

$$T_{ix} = \frac{T_{e\alpha}}{D_{ix}^3} = 0,4$$

Parametri PID regulatora pozicije kuglice po osi y:

$$D_{iy} = 0,5$$

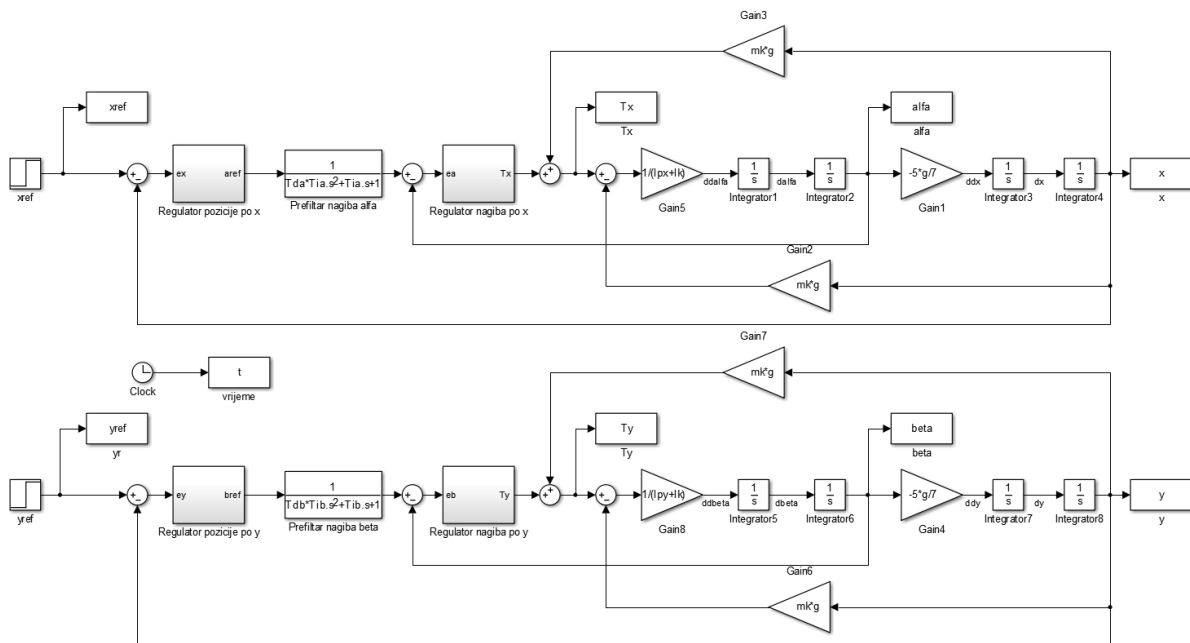
$$T_{ey} = \frac{T_{e\beta}}{D_{iy}^3} = 0,4$$

$$K_{ry} = -\frac{7 D_{iy}^3}{5 g T_{e\beta}^2} = -7,1356$$

$$T_{dy} = \frac{T_{e\beta}}{D_{iy}^2} = 0,2$$

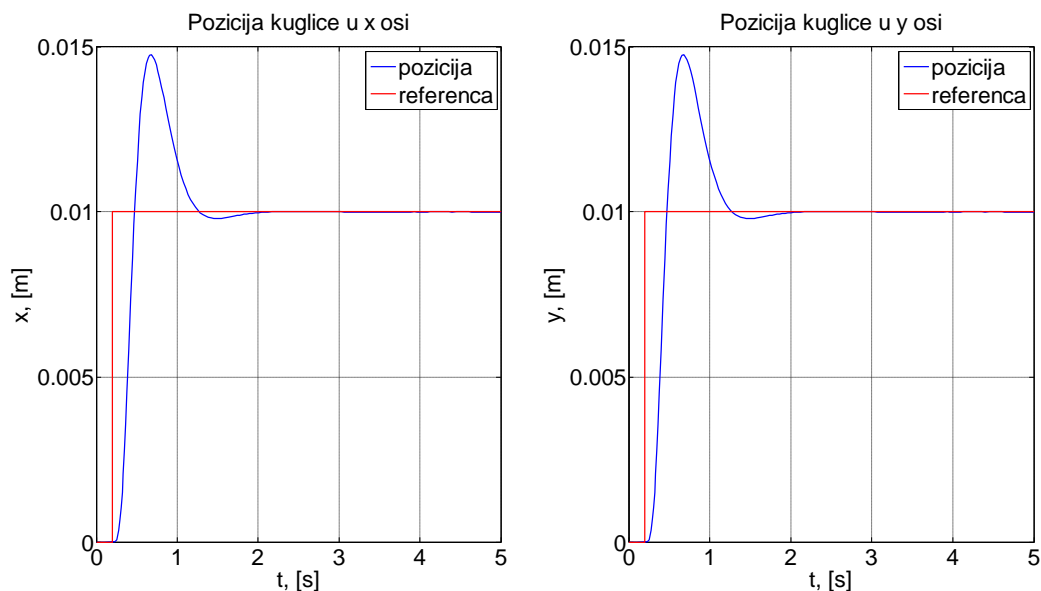
$$T_{iy} = \frac{T_{e\beta}}{D_{iy}^3} = 0,4$$

S prethodno prikazanih parametara regulatora, vidljivo je kako je pojačanje regulatora pozicije negativnog predznaka. Uzrok tome su koordinatne osi zbog kojih se dobiva negativna dinamika kretanja kuglice po ploči.

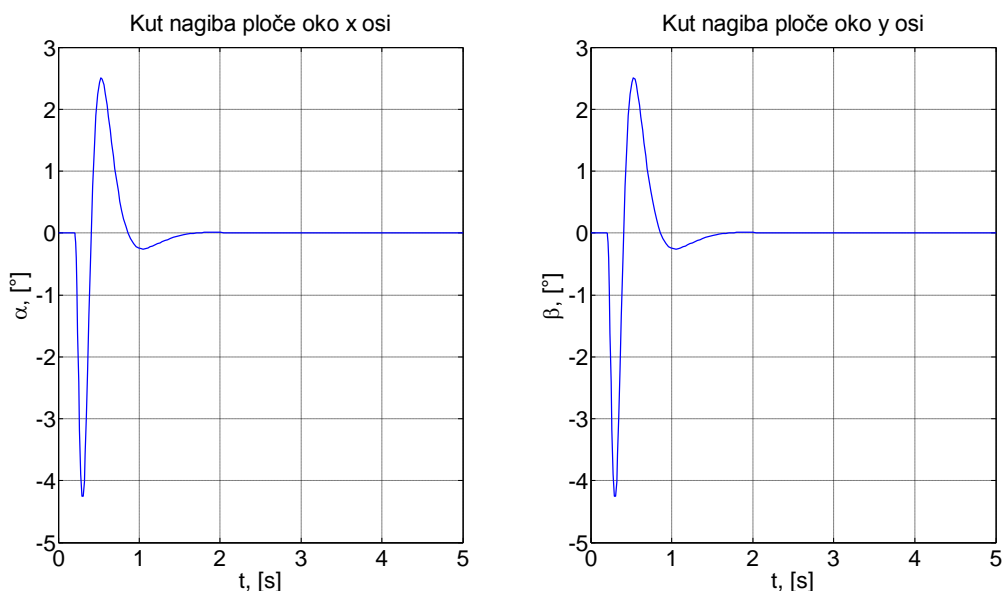


Slika 40: Regulacijski krug pozicije kuglice na ploči bez prefiltra

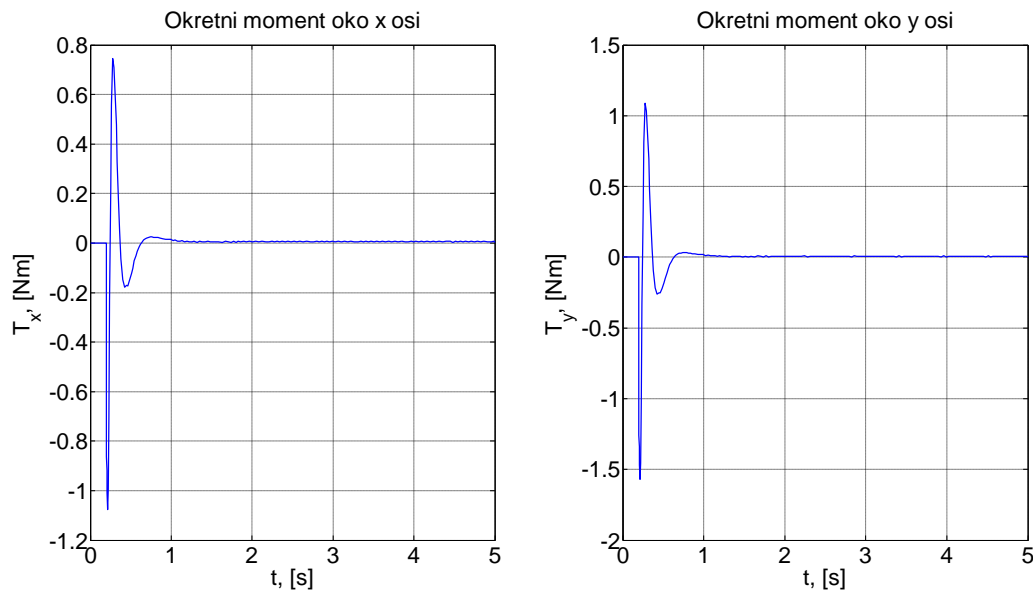
Kod kaskadne regulacije izlaz regulatora nadređenog kruga predstavlja ulaz regulatoru podređenog kruga, tako da u ovom radu izlaz regulatora pozicije predstavlja ulaz regulatoru nagiba. Prednost kaskadne regulacije je što se djelovanje poremećajnih veličina u regulacijskom sustavu potiskuje na lokalnom nivou.



Slika 41: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv pozicije kuglice



Slika 42: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv kuta nagiba ploče



Slika 43: Rezultati simulacije regulacijskog kruga pozicije kuglice bez prefiltra, odziv okretnih momenata

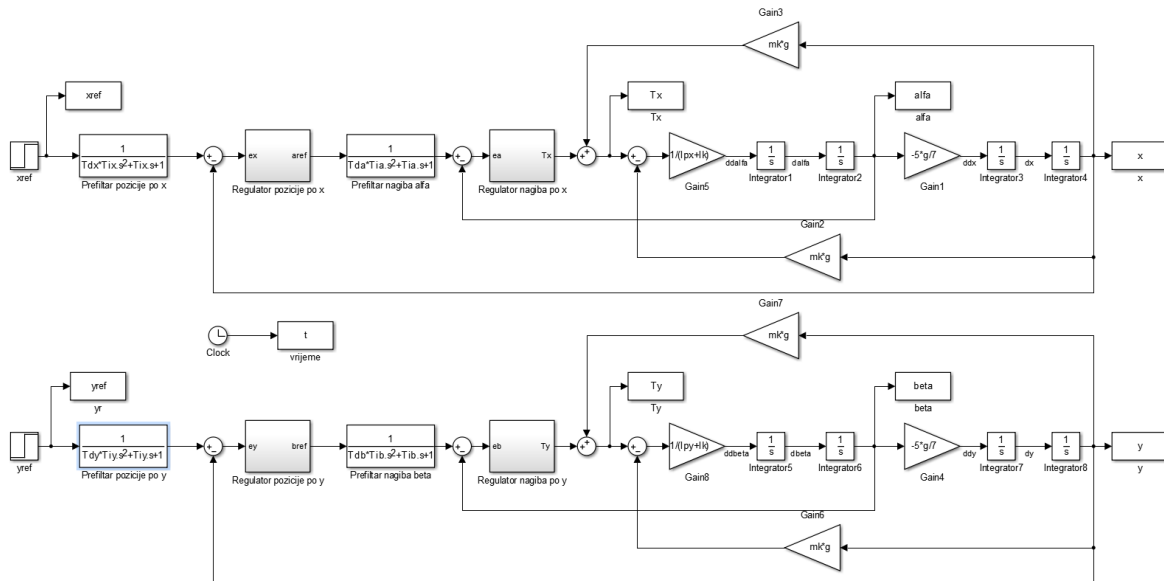
Parametri simulacije:

$$x_o = 0 \text{ m}, \quad y_o = 0 \text{ m},$$

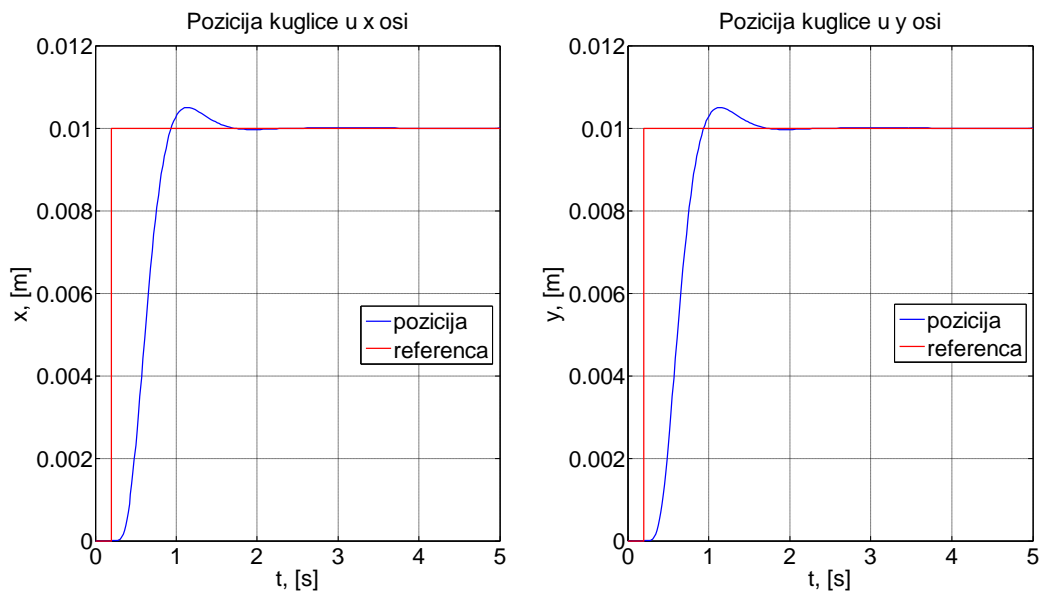
$$x_{ref} = 0,01 \text{ m}, \quad y_{ref} = 0,01 \text{ m}.$$

Zbog derivirajućeg djelovanja nule u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga pozicije kuglice na ploči dolazi do nadvišenja. Kako bi se eliminiralo derivirajuće djelovanje, u granu reference pozicije dodaje se prefilter drugog reda (PT₂ član) čija prijenosna funkcija glasi:

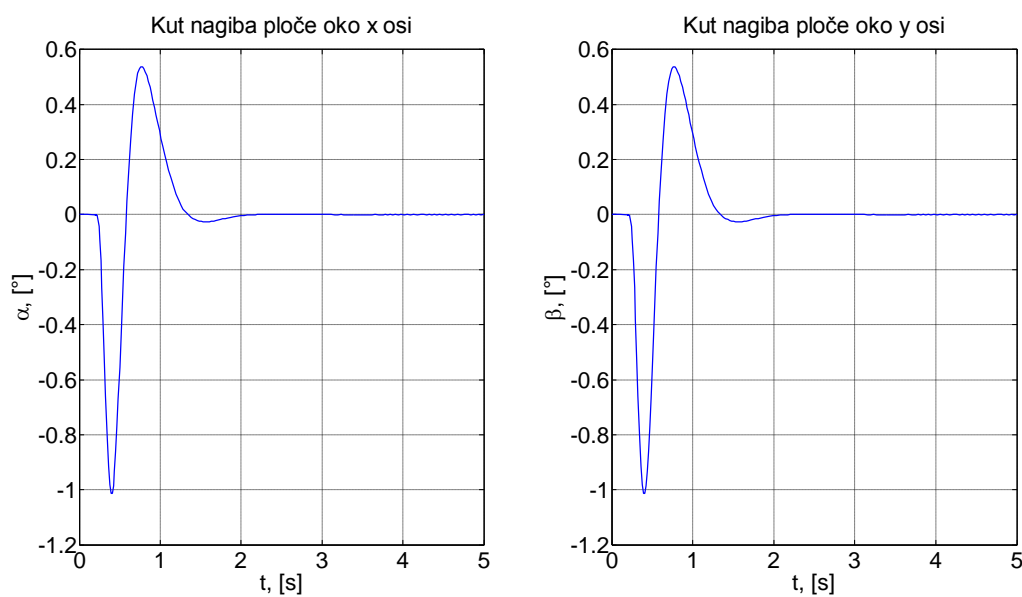
$$G_{pfx} = \frac{1}{T_{dx}T_{ix}s^2 + T_{ix}s + 1} \quad (6.15)$$



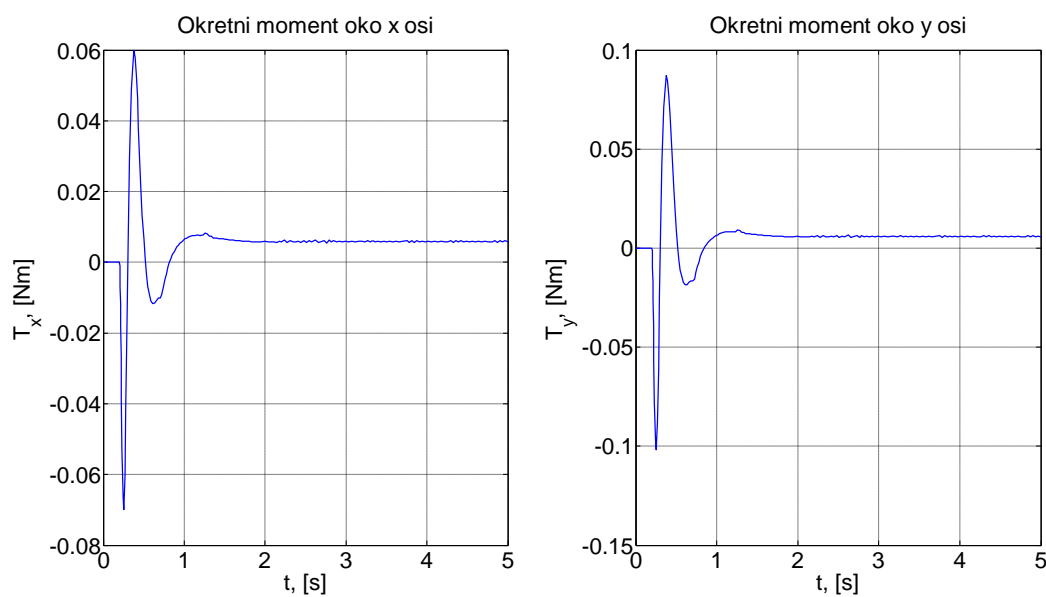
Slika 44: Regulacijski krug pozicije kuglice s prefiltrom



Slika 45: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv pozicije kuglice



Slika 46: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv kuta nagiba ploče



Slika 47: Rezultati odziva regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv okretnih momenata

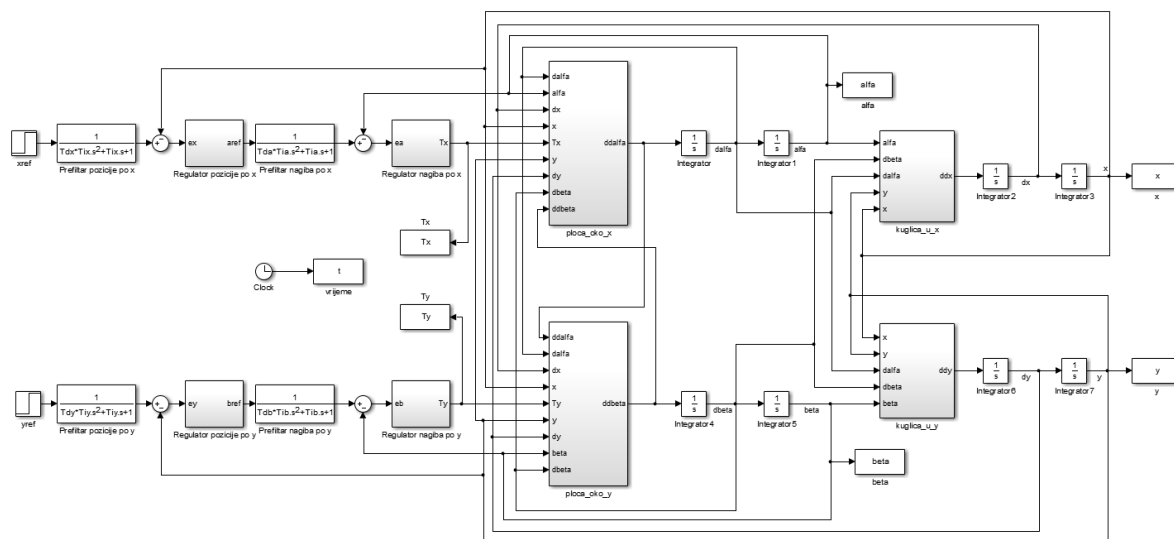
Parametri simulacije:

$$x_o = 0 \text{ m}, \quad y_o = 0 \text{ m},$$

$$x_{ref} = 0,01 \text{ m}, \quad y_{ref} = 0,01 \text{ m}$$

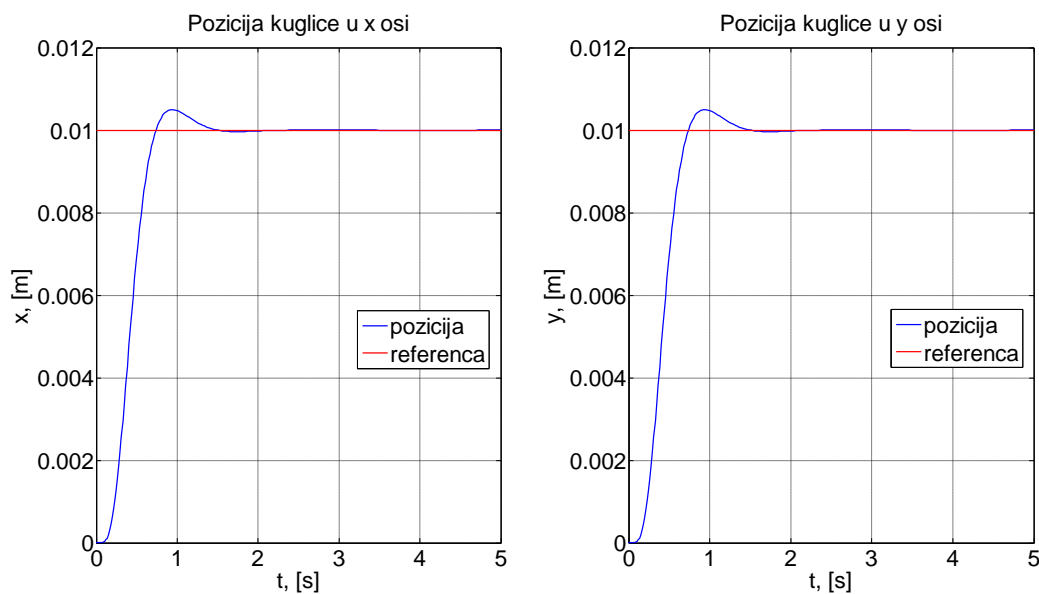
6.3.3. Regulacijski krug pozicije kuglice nelinearnog matematičkog modela

Nakon što su izvedeni i ispitani parametri regulatora na lineariziranom matematičkom modelu, isti su upotrijebljeni za regulaciju nelinearnog matematičkog modela.

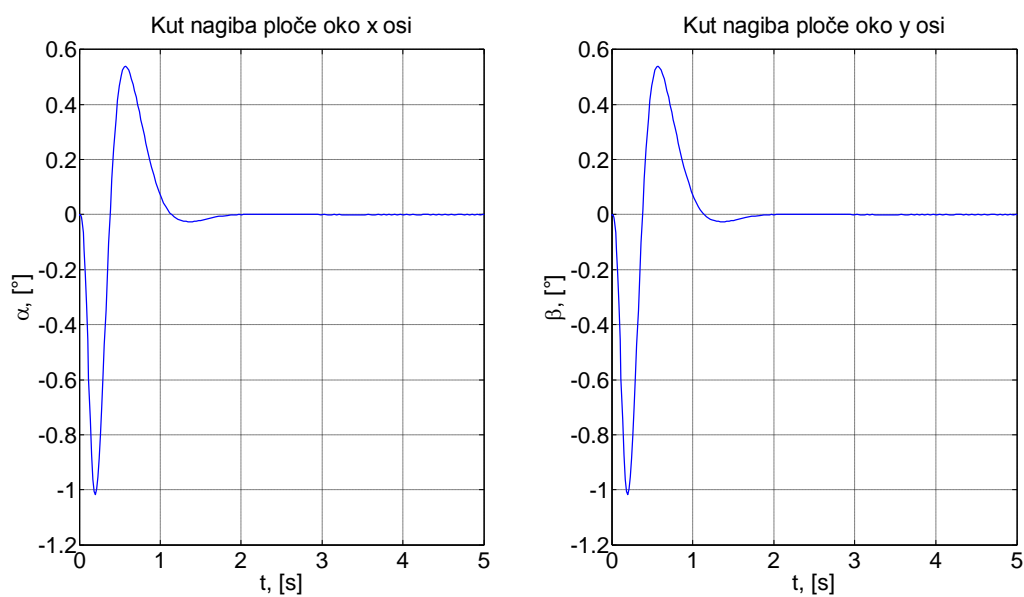


Slika 48: Nelinearni regulacijski krug pozicije kuglice s prefiltrom

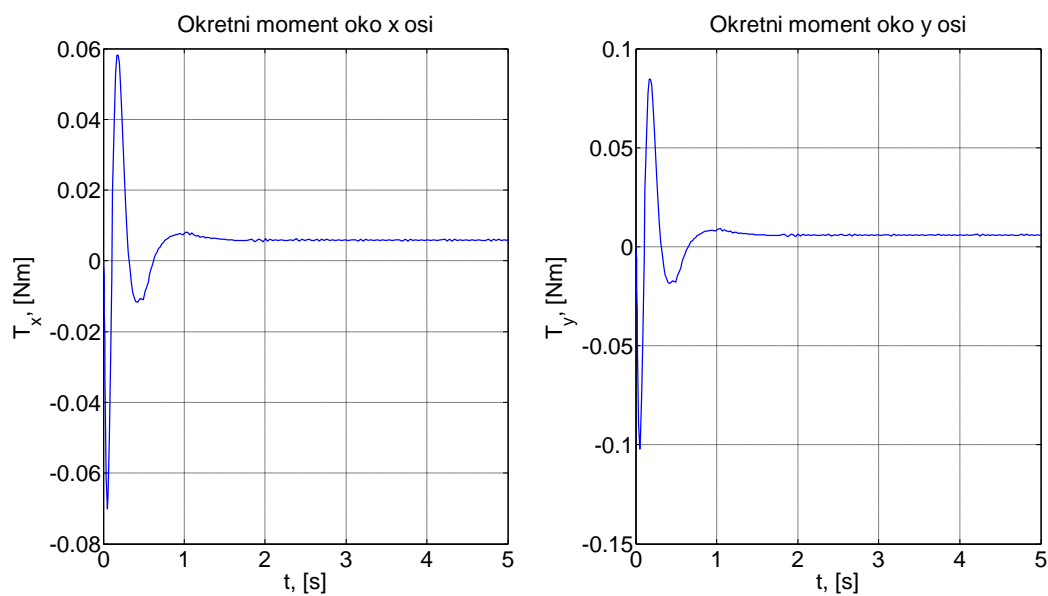
Na slikama 49 i 50 vidljivo je kako su odzivi nelinearnog regulacijskog kruga slični onima prikazanim kod linearnog regulacijskog kruga iz čega se može zaključiti kako je uspješno provedena sinteza regulatora.



Slika 49: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefiltrom, odziv pozicije kuglice



Slika 50: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefitrom, odziv kuta nagiba ploče



Slika 51: Odziv nelinearnog regulacijskog kruga pozicije kuglice s prefitrom, odziv okretnih momenata

Parametri simulacije:

$$x_o = 0 \text{ m}, \quad y_o = 0 \text{ m},$$

$$x_{ref} = 0,01 \text{ m}, \quad y_{ref} = 0,01 \text{ m}$$

7. ZAKLJUČAK

Projektiranje i regulacija sustava kuglice na ploči pokretanog pneumatskim mišićima pokazao se kao vrlo izazovan projekt u kojem je bilo potrebno konstruirati mehaničku konstrukciju i osmisлити način montiranja takav da bude intuitivan i lagan, korištenjem tek nekoliko alata. Načinjen je izbor komponenti mehaničkog, mjernog i upravljačkog dijela sustava, izabrane komponente vrlo su kompleksne te su predstavile dovoljno problema, kod samog montiranja na sustav, koji su u konačnici riješeni.

Izveden je matematički model sustava te načinjena sinteza regulatora. Izabran je PID regulator koji se pokazao vrlo dobrim za regulaciju pozicije kuglice što pokazuju i rezultati provedenih simulacija.

U daljnjem radu fokus će biti na projektiranju potrebnih elektroničkih komponenti, kalibraciji senzora i programiranju mikrokontrolera. Planirano je u budućnosti dodati komunikacijski modul na mikrokontroler kako bi se omogućilo upravljanje sustava mobitelom što bi pridonijelo interaktivnosti radu.

LITERATURA

- [1] Heavy-duty Ball Joint Pad, SMC katalog proizvoda, 2015.
- [2] Fluidic Muscle DMSP/MAS, FESTO katalog proizvoda, 2008.
- [3] Šitum, Ž.: Pneumatski mišić kao aktuator, Znanstveno-popularni časopis Sustavi, god. 3, br. 5, str. 54-60
- [4] Proportional directional control valves MPYE, FESTO katalog proizvoda, 2015.
- [5] Trslić, P.: *Projektiranje i regulacija balansirajućeg sustava pokretanog pneumatskim mišićima*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.; završni rad
- [6] »Arduino - HomePage,« [Mrežno]. Available: <http://arduino.cc>.
- [7] Stojčević, B.: *Upravljanje radom zaklopke snage motora s unutarnjim izgaranjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.; diplomski rad
- [8] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.2, Invensense katalog, 2011.
- [9] Nokhbeh, M., Khashabi, D.: *Modeling and Control of Ball-Plate System*, Amirkabir University of Technology, 2011.
- [10] Majetić, D.: Materijali za predavanja iz kolegija "Upravljanje i regulacija", 2011.
- [11] Pavković, D.: Materijali za vježbe iz kolegija "Elektromotorni servopogoni", 2010.

PRILOG: TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

Na sljedećih 11 listova nalazi se potpuna tehnička dokumentacija korištena prilikom izrade mehaničke konstrukcije sustava za regulaciju kuglice na ploči. Uključeno je 6 tehničkih crteža formata papira A4 i 4 radionička crteža i 1 sklopni crtež formata papira A3.

Zbog tehničkih razloga crteži su dostupni samo u tiskanom izdanju ovog rada.