

# Modeliranje i regulacija stege za pričvršćivanje osjetljivog obratka

---

**Sever, Patrick**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:235:570465>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Patrick Sever**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

doc. dr. sc. Mihael Cipek

Student:

Patrick Sever

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se obitelji na podršci tokom studija, te mentoru doc. dr. sc. Mihaelu Cipeku pri pomoći u izradi rada.

Patrick Sever



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: <b>602 – 04 / 24 – 06 / 1</b>	
Ur.broj: <b>15 – 24 –</b>	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Patrick Sever** JMBAG: **0035239923**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i regulacija stege za pričvršćivanje osjetljivog obratka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling and control of a clamp for sensitive workpiece**

Opis zadatka:

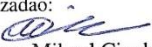
Završna strojna obrada često se svodi na visokobrzinsko odvajanje čestica pomoću kojeg se postižu veća kvaliteta izradaka i točnost. U slučaju osjetljivijih obradaka koji imaju mekšu površinu često je potrebno izvršiti pažljivo stezanje odgovarajućom silom koja mora biti dovoljna da se obradak zadržava na željenoj poziciji, a da pri tome ne dolazi do oštećenja površine steznim mehanizmom. Stoga se u ovome radu predlaže idejno rješenje regulirane stege za pričvršćivanje osjetljivog obratka. U radu je potrebno:

- opisati problem stezanja osjetljivih predmeta za strojnu obradu
- napraviti pregled tržišta postojećih rješenja
- predložiti nekoliko koncepata te napraviti usporednu analizu izvršiti odabir
- napraviti proračun sila i brzina te izvršiti odabir aktuatora
- definirati upravljački sustav i provesti simulacije.

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

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Zadatak zadao:   
 doc. dr. sc. Mihael Cipek

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 11. 7. 2024.  
**3. rok:** 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 15. 7. 2024.  
**3. rok:** 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

  
 izv. prof. dr. sc. Petar Čurković

---

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1 Pregled tržišta postojećih rješenja.....	1
2. KONCEPTI MODIFICIRANIH STEZNIH SUSTAVA .....	4
2.1 Koncept A .....	4
2.2 Koncept B .....	5
2.3 Koncept C .....	6
2.4 Odabir najboljeg koncepta .....	7
3. PRORAČUN SILA I BRZINA .....	9
3.1 Proračun sila .....	9
3.2 Proračun parametra vretena.....	10
3.3 Proračun momenta trenja na matici.....	11
3.4 Odabir aktuatora .....	12
3.4 Proračun brzine .....	13
4. MODELIRANJE REGULACIJSKOG KRUGA .....	14
4.1 Matematički model DC elektro motora.....	14
4.1.1 Prebacivanje u donje s područje .....	16
4.2 Kaskadna struktura upravljanja .....	17
4.2.1 Opis članova regulacijskog kruga .....	18
4.2.2 Proračun regulatora .....	23
5. SIMULACIJA SUSTAVA .....	29
5.1 Simulink model regulacijskog kruga.....	29
5.1.1 Regulacijski krug pozicije .....	29
5.1.2 Regulacijski krug brzine.....	30
5.1.3 Regulacijski krug struje.....	31
5.2 Odziv sustava na ulazne vrijednosti .....	31
5.3 Osvrt na rezultate .....	35
6. ZAKLJUČAK.....	37

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Škripac s pneumatskim zakretnim aktuatorom [2] .....	2
Slika 2. Pneumatski škripac s mekanim čeljustima [3] .....	2
Slika 3. Električni škripac [4] .....	3
Slika 4. Koncept A .....	4
Slika 5. Koncept B .....	5
Slika 6. Koncept C .....	6
Slika 7 Sile na matici.....	12
Slika 8. Shema DC elektromotora.....	15
Slika 9. Kaskadni regulacijski krug.....	17
Slika 10. Regulacijski krug struje .....	23
Slika 11. Regulacijski krug brzine .....	25
Slika 12. Regulacijski krug položaja.....	27
Slika 13. Simulink regulacijski krug položaja .....	29
Slika 14. Simulink regulacijski krug brzine .....	30
Slika 15. Simulink regulacijski krug struje .....	31
Slika 16. Odziv pozicije .....	32
Slika 17. Odziv brzine .....	33
Slika 18. Odziv struje .....	34
Slika 19. Odziv sile .....	35
Slika 20. Senzor brzine.....	43
Slika 21. Armatura .....	43
Slika 22. Prefiltar brzine.....	43
Slika 23. Moment trenja na matici .....	44
Slika 24. Kompenzacija EMS .....	44
Slika 25. Senzor struje.....	44
Slika 26. Tranzistorski pretvarač.....	45
Slika 27. DA pretvarač .....	45

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Matrica odlučivanja.....	7
Tablica 2. Specifikacije glodanja različitih materijala [5], [15].....	9
Tablica 3. Secifikacije trenja između parova materijala [6].....	9
Tablica 4. Specifikacije vretena[7].....	10
Tablica 5. Specifikacije matice .....	11
Tablica 6. Specifikacije DC elektromotora [8] .....	13
Tablica 7. Specifikacije reduktora [9] .....	13
Tablica 8. Specifikacije D/A pretvarača [10].....	18
Tablica 9. Specifikacije tranzistorskog pretvarača [11].....	19
Tablica 10. Potrebne specifikacije DC elektromotora za proračun parametara prijenosne funkcije [8] .....	20
Tablica 11. Specifikacije senzora struje [12] .....	21
Tablica 12. Specifikacija senzora pozicije [8] .....	21
Tablica 13. Specifikacije senzora brzine [13] .....	22
Tablica 14. Ulazni podaci za simulaciju .....	31



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_r$	N	Sila rezanja
$K_c$	N/mm <sup>2</sup>	Specifična sila rezanja
$a_p$	mm	Dubina rezanja
$f_z$	mm/zub	Posmak
$F_P$	N	Sila pritezanja
$\mu$	-	Trenje
$\alpha$	°	Kut uspona
$P$	mm	Korak
$D_2$	mm	Srednji promjer vretena
$\beta$	°	Kut nagiba boka
$l$	mm	Duljina
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$D$	mm	Vanjski promjer vretena
$\eta$	-	Korisnost
$J_v$	Kgm <sup>2</sup>	Inercija vretena
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$g$	m/s <sup>2</sup>	Gravitacijsko ubrzanje
$F_n$	N	Normalna sila
$F_{tr}$	N	Sila trenja
$F_m$	N	Težina
$M_{tr}$	Nm	Moment trenja
$M_m$	Nm	Moment motora
$v$	mm/s	brzina
$i$	-	Prijenosni omjer
$J_r$	Kgm <sup>2</sup>	Inercija reduktora
$U_A$	V	Napon armature
$e$	V	Inducirani napon na elektromotoru
$R_A$	$\Omega$	Otpor armature
$i_A$	A	Struja armature
$L_A$	H	Induktivitet armature
$K_E$	Vs/rad	Konstanta elektromotornog napona
$\phi$	Wb	Magnetski tok
$n$	min <sup>-1</sup>	Broj okretaja
$K_e$	Vs/rad	Konstanta elektromotornog napona
$\omega$	rad <sup>-1</sup>	Kutna brzina
$m$	Nm	Moment motora
$K_m$	Nm/A	Konstanta momenta

---

$m_t$	Nm	Moment tereta
$J$	Kgm <sup>2</sup>	Inercija
$\epsilon$	rad	Kut zakreta
$K_{DA}$	V	Pojačanje D/A pretvarača
$\tau_{DA}$	ms	Vremenska konstanta D/A pretvarača
$N$	-	Broj bitova
$U$	V	Napon D/A pretvarača, elektromotora
$u$	V	Ulazni napon tranzistorskog pretvarača
$U_b$	V	Napon međukruga
$f_{ch}$	MHz	Prekidačka frekvencija tranzistora
$K_{ch}$	-	Pojačanje tranzistarskog pretvarača
$\tau_{ch}$	$\mu$ s	Vrijeme uzrokovanja
$I$	A	Struja elektromotora, opseg mjerenja senzora
$K_A$	A/V	Pojačanje armature
$T_A$	$\mu$ s	Vremenska konstanta armature
$K_i$	mV/A	Pojačanje senzora struje
$\tau_i$	$\mu$ s	Vremenska konstanta senzora struje
$K_\epsilon$	rad <sup>-1</sup>	Pojačanje senzora pozicije
$K_\omega$	Vs/rad	Pojačanje tahometra
$\tau_\omega$	ms	Vremenska konstanta tahometra

---

**SAŽETAK**

Rad se bavi problemom stezanja osjetljivih obratka u strojnoj obradi. U radu je napravljen pregled tržišta postojećih rješenja steznih uređaja uz detaljan opisi njihovih pojedinosti i nedostataka. Prema postojećim rješenjima predložena su tri nova koncepta od kojih je odabran onaj koji je najbolje ocjenjen matricom odlučivanja. Za odabrani koncept napravio se proračun sila i brzina kako bi se odabrao adekvatan aktuator. Za stezni uređaj je zatim predložen regulacijski sustav te je na temelju računalnih modela napravljena kratka analiza i opis dobivenih rezultata.

Ključne riječi: stezni uređaj, osjetljivi obradak, strojna obrada, regulacija, simulacija

---

**SUMMARY**

The paper deals with the problem of clamping sensitive workpieces in machining. The paper provides an overview of the market of existing clamping device solutions with a detailed description of their details and shortcomings. According to the existing solutions, three new concepts were proposed, of which the one that was best evaluated by the decision-making matrix was selected. For the chosen concept, a calculation of forces and speeds was made in order to choose an adequate actuator. A regulation system was then proposed for the clamping device, and a brief analysis and description of the obtained results was made on the basis of computer models.

Key words: clamping device, sensitive workpiece, machining, regulation, simulation

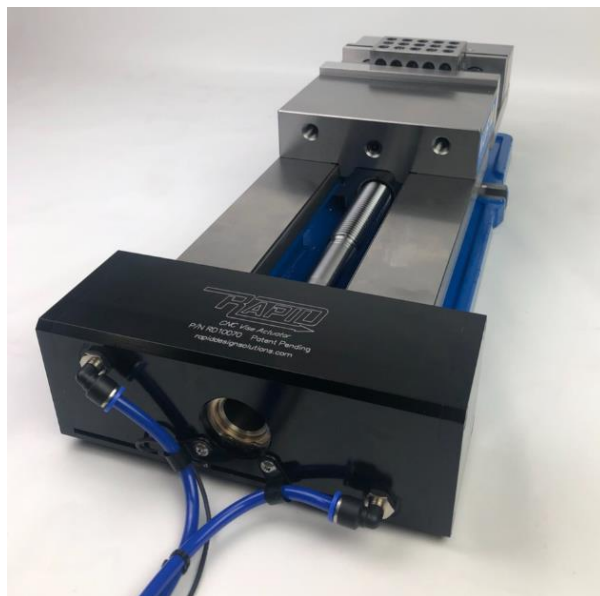
## 1. UVOD

Strojna obrada je proces koji koristi svaka današnja industrija u svrhu izrade složenih i preciznih dijelova. Razvojem industrije i uvođenjem numeričkih upravljanih strojeva unaprijedilo je proizvodne procese, omogućilo je veću brzinu, točnost, te ponovljivost proizvodnje. Svaka strojna obrada zahtjeva dobro osiguranje komada koji se obrađuje. Osiguranje komada od pomicanja i deformacija postiže se pomoću naprava za stezanje. Naprave koje stežu komad moraju biti krute i također nepomične u odnosu na radni stol na kojem se nalaze. Komad se najčešće osigurava silom i oblikom, sila mora biti dovoljno velika da pridržava komad, a da pri to me ne dolazi do deformacije, također oblikom mora odgovarati komadu kako ne bi došlo do pomicanja ili površinskog oštećenja. Deformacija materijala može uzrokovati promjenu dimenzija obratka, što rezultira smanjenju preciznosti i kvalitete obrade. Vrlo često, stezanje se vrši ručno te sila pritezanja nije konstantna, odnosno nije optimalna za komad koji je potrebno pričvrstiti, stoga je došlo do potrebe koja će ukloniti tu pogrešku. Upravljanje procesa stezanja nam daje mogućnost ne samo da smanjimo tu pogrešku nego da i ubrzamo cijeli proces izmjene komada. Regulacijom sile i brzine pritezanja nam omogućuje automatizaciju procesa te mogućnost povezivanja robota koji posluhuje radni stroj te tako dodatno ubrzava proces i poboljšava ponovljivost [1].

Osjetljivi materijali poput mekih metala, kompozita, keramike, plastike imaju manju otpornost na deformacije i površinskih oštećenja, te kao takvi materijali su posebno osjetljivi na sile pritezanja. Problem nije samo u vrsti materijala, također problem se javlja kod geometrije, kao što su nesimetrični, taknkostijeni i mali komadi. Svaka nekontrolirana sila pritezanja može dovesti do promjene oblika, loma, te površinskog oštećenja obratka. Kod zahtjevnije geometrije se javlja potreba za ravnomjernom distribucijom sile.

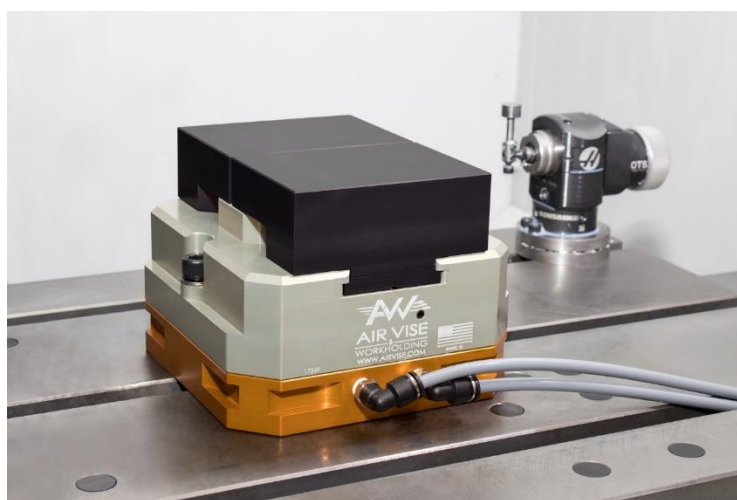
### 1.1 Pregled tržišta postojećih rješenja

Slika 1. prikazuje škripac koji na sebi sadrži pneumatski zakretni aktuator. Škripac i aktuator nisu proizvedeni od istog proizvođača te se kupuju zasebno. Aktuator se može zakrenuti za 225° te proizvesti moment 9-55 Nm. Problem kod tog sustava pritezanja je taj što se škripac prvo mora ručno približiti komadu kojeg steže pa tek onda postaviti aktuator na škripac kako bi stegnuo komad, te taj aktuator kompatibilan samo za škripce za 3 proizvođača. Aktuator dolazi u dvije verzije, jedna sa senzorom IP67 za povratnu vezu regulacije, te bez tog senzora [2].



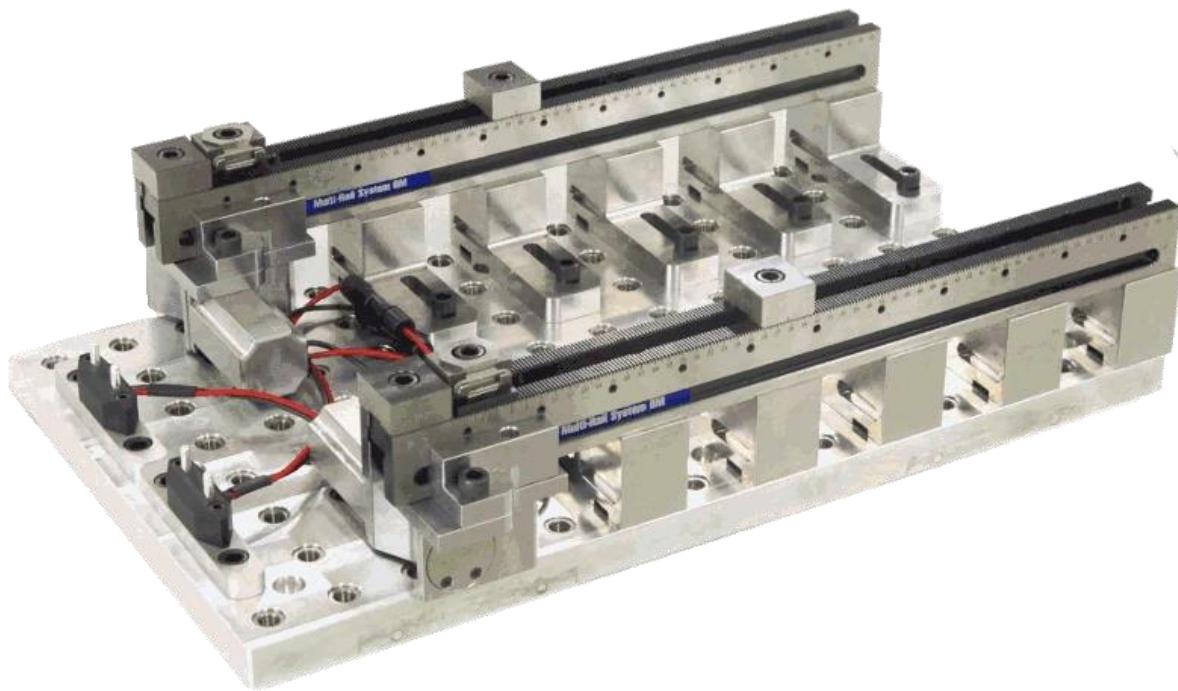
Slika 1. Škripac s pneumatskim zakretnim aktuatorom [2]

Slika 2. prikazuje pneumatski škripac sa mekanim čeljustima. Čeljusti ostvaruju male pomake prema centru škripca, zato što se zapravo one obrade na geometriju komada koji ide u njih, pa su mali pomaci dovoljni za pritezanje komada koji ide na obradu. Škripac može ostvariti silu od 16 KN, problem kod takvih škripaca je to što kad se obrade čeljusti za specifični komad koriste se samo za taj komad te se trebaju kupiti ponovno druge čeljusti i obraditi za drugi komad [3].



Slika 2. Pneumatski škripac s mekanim čeljustima [3]

Slika 3. prikazuje električni sustav pritezanja sa dvije vodilice, na svakoj vodilice se nalazi električni aktuator i dva stopera. Aktuator se aktivira pomoću elektromotora, aktuator je kratkohodan odnosno ima male pomake, pa je potrebno stopere postaviti ručno, problem kod ručnog postavljanja stopera je taj što osim što oduzima vrijeme potrebno je točno i precizno uskladiti stopere kako bi došlo do pravilnog stezanja [4].



**Slika 3. Električni škripac [4]**

## 2. KONCEPTI MODIFICIRANIH STEZNIH SUSTAVA

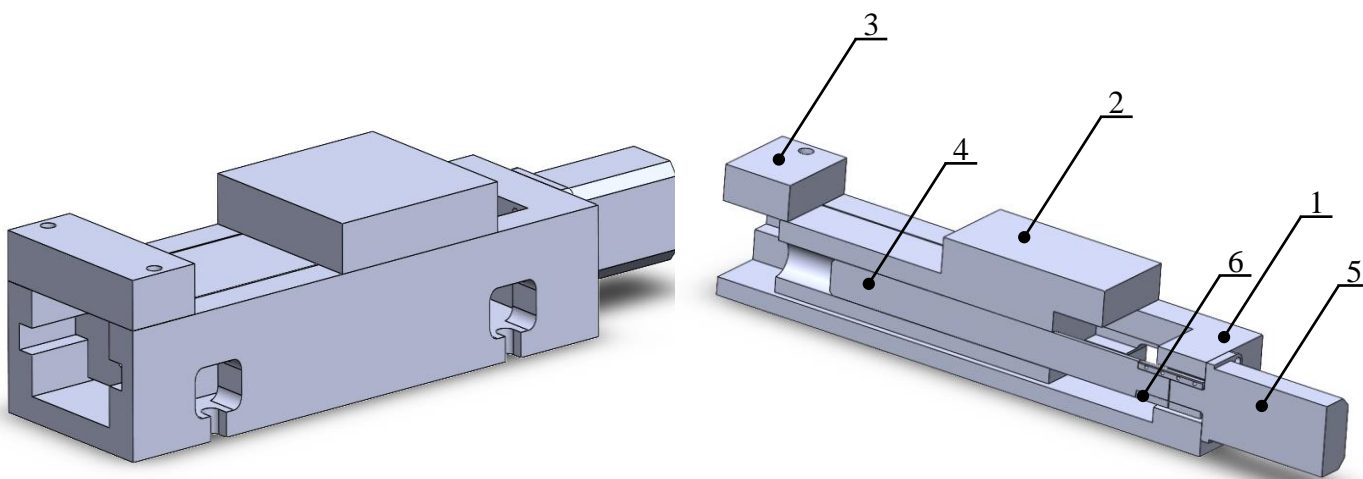
Proučavanjem postojećih rješenja osmišljena su tri koncepta koja će se nadalje vrednovati po raznim parametrima koji su važni za funkcionalnost i kontrolu škripca. Nadalje slijedi 3D model koncepta te njegov opis i popis komponenata koji bi se koristio.

### 2.1 Koncept A

Slika 4. prikazuje 3D model prvog koncepta gdje su brojevima označeni dijelovi:

1. Tijelo škripca
2. Pomična čeljust
3. Nepomična čeljust
4. Vreteno
5. Motor
6. Spojka

Tijelo škripca (1.) povezuje sve komponente zajedno u funkcionalnu cjelinu, ima utore koji služe povezivanje radnog stola obradnog stroja i škripca, provrte za pričvršćivanje motora na škripac, te provrte za povezivanje škripca i nepomične čeljusti (3.), oblikom omogućuje klizanje pomične čeljusti (2.). Pomična čeljust pokreće se vretenom (4.) koje je spojkom (6.) spojeno na motor (5.).



Slika 4. Koncept A

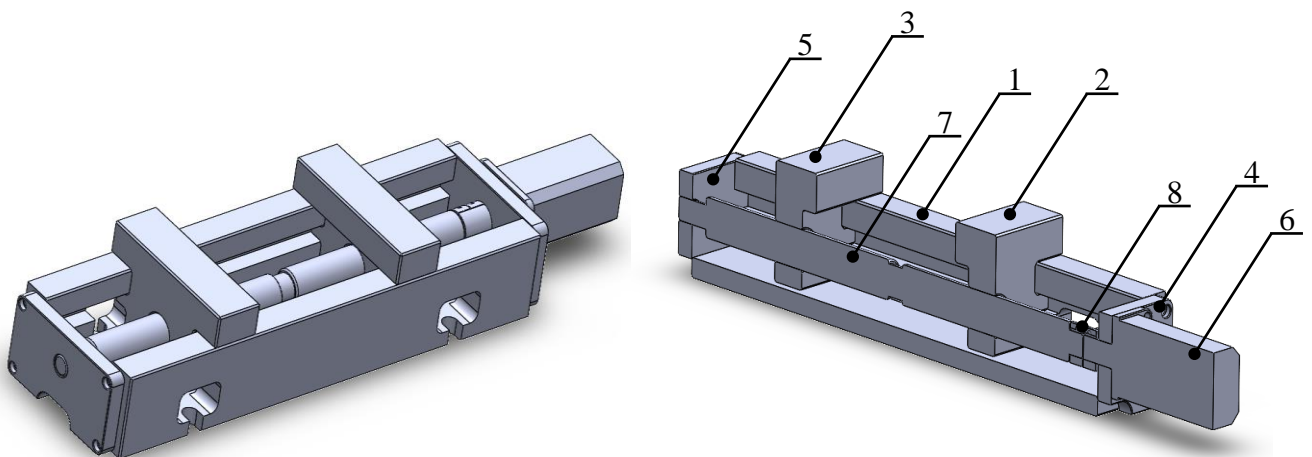


## 2.2 Koncept B

Slika 5. prikazuje 3D model drugog koncepta gdje su brojevima označeni dijelovi:

1. Tijelo škripca
2. Pomična čeljust D
3. Pomična čeljust L
4. Poklopac D
5. Poklopac L
6. Motor
7. Vreteno
8. Spojka

Kao što je spomenuto u konceptu A, Tijelo škripca (1.) povezuje sve komponente škripca te omogućuje povezivanje radnog stola obradnog stroja i škripca. Koncept B za razliku od koncepta A prikazuje samo centrirajući škripac koji ima dvije pomične čeljusti (2.) i (3.). Čeljusti se pokreću pomoću vretena (7.) koje mora biti i desno vojno i lijevo vojno da bi se čeljusti gibale jedna prema drugoj. Vreteno je s jedne strane spojeno sa poklopcem (5.) i ležajem, te s druge strane preko spojke (8.) i poklopca (4.) na motor (6.).



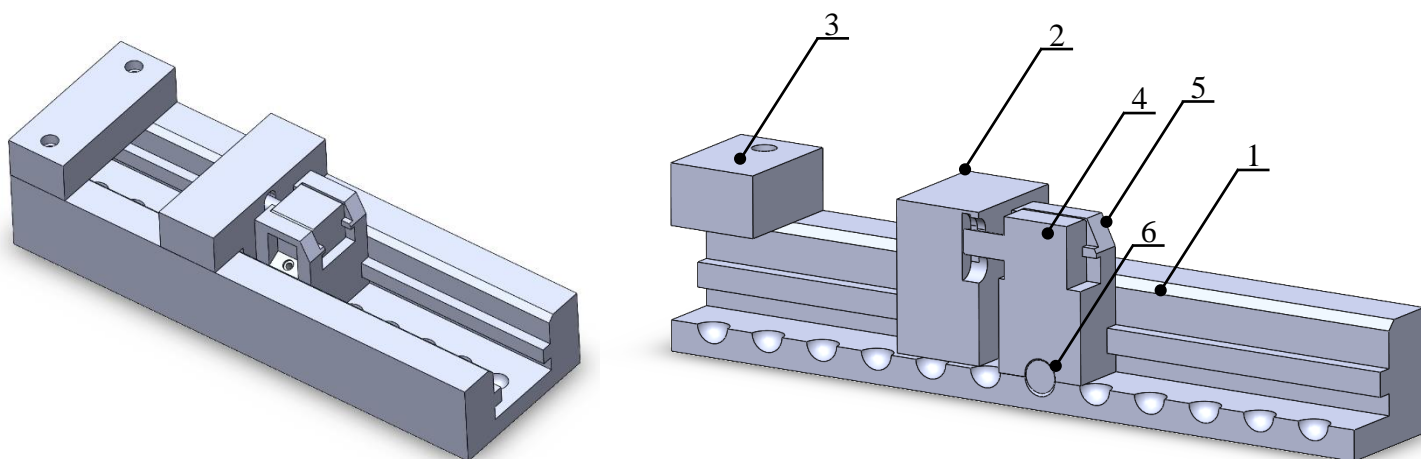
Slika 5. Koncept B

## 2.3 Koncept C

Slika 6. prikazuje 3D model trećeg koncepta gdje su brojevima označeni dijelovi:

1. Tijelo škripca
2. Pomična čeljust
3. Nepomična čeljust
4. Kratkohodni cilindar
5. Nosač cilindra
6. Kuglica

Linearno gibanje u konceptu C ostvaruje se pomoću pneumatskog cilindra (4.) koji ostvaruje mali hod, pa je potrebno ručno pomicati nosač cilindra (5.) i pomičnu čeljust (2.). Nosač cilindra nakon što se pomakne, pomoću kuglice (6.) i šarafa se učvrsti kako bi cilindar (4.) mogao obavljati funkciju pomicanja i ostvarivanja sile na pomičnoj čeljusti (2.).



Slika 6. Koncept C

## 2.4 Odabir najboljeg koncepta

Kako bi odabrali najprikladniji koncept potrebno ga je vrednovati prema kriterijima koji su važni u primjeni škripca. Vrednovat će se prema metodi matrice odlučivanja. Matrica odlučivanja sadrži kriterije, težinski faktor, ocjenu i ponderiranu ocjenu.

Kriteriji su odabrani prema primjeni škripca te će biti objašnjeni ispod Tablice 1. koja prikazuje matricu odlučivanja. Težinski faktor govori o tome koliko je važan kriterij kojeg ocjenjujemo, ocjenu 5 pridružujemo konceptu koji najviše odgovara tom kriteriju, a ocjenu 1 koji najmanje odgovara kriteriju, te ponderirana ocjena je umnožak ocjene koncepta i težinskog faktora. Ponderirane ocjene se zbrajaju po kriteriju te se dobije konačna ocjena koncepta, koncept s najvišom ocjenom je konačan koncept koji se dalje detaljnije razrađuje te konačno izrađuje.

**Tablica 1. Matrica odlučivanja**

Kriterij	Težinski faktor	Koncepti					
		Ocjena			Ponderirana ocjena		
		Koncept A	Koncept B	Koncept C	Koncept A	Koncept B	Koncept C
Upravlјivost	0,3	5	3	3	1,5	0,9	0,9
Autonomnost	0,3	4	4	4	1,2	1,2	1,2
Robusnost	0,2	5	3	3	1	0,6	0,2
Masa	0,15	2	3	4	0,3	0,45	0,6
Veličina	0,05	3	3	5	0,15	0,15	0,25
Ukupna ocjena					4,15	3,3	3,15

Upravlјivost - vrlo važna, zato što je cilj upravljati procesom stezanja te dobra upravljivost omogućuje precizno pozicioniranje i stezanje.

Autonomnost – vrlo važna, cilj autonomnosti škripca je ta da smanji potrebu za nadzorom operatera i njegovom intervencijom, također povećava produktivnost i točnost

Robusnost- važna, potrebno je manje održavanje te omogućuje stabilno i sigurno stezanje komada

Masa-manje važna, prilikom zamjene škripca ili eventualnog pomicanja po radnom stolu mora biti lakši da operater može samostalno prilagoditi željenu poziciju

Veličina-najmanje važna, omogućuje instalaciju škripca u stroj, nije toliko važna zato što po prirodi škripci za osjetljive komade nisu dimenzijski veliki

### 3. PRORAČUN SILA I BRZINA

Važno je proračunati sile pritezanja kako bi se osigurala dovoljna sila da obradak bude sigurno pričvršćen tokom obrade, također je važno proračunati brzine pritezanja kako bi ta operacija bila efikasna i da se spriječi udar pre velikom brzinom u obradak. Proračun sila i brzina će nam omogućiti odabir pravilan odabir akturатора.

#### 3.1 Proračun sila

Pojednostavljeno sila stezanja se može proračunati na temelju koeficijenta trenja između obratka i čeljusti škripca i rezne sile.

**Tablica 2. Specifikacije glodanja različitih materijala [5], [15]**

	Čelik	Aluminij	Titan
Specifična sila rezanja [N/mm <sup>2</sup> ]	1500-3100	400-700	1300-1400
Posmak [mm/zub]	0,24	0,3	0,2
Faktor korekcije debljine čestice	0,25	0,25	0,23
Debljina odvojene čestice[mm]	0,2		
Dubina rezanja [mm]	0,2-0,5		

Rezna sila  $F_r$  dana je izrazom u nastavku prema [5]:

$$F_r = K_c \cdot hp^{-mc} \cdot a_p \cdot f_z \quad (1)$$

Gdje su  $K_c$  specifična sila rezanja,  $a_p$  dubina rezanja,  $f_z$  posmak rezanja,  $mc$  faktor korekcije debljine čestice,  $hp$  debljine odvojene čestice. Ako se u izraz (1) uvrste vrijednosti iz Tablice 2. za različite materijale sila može poprimiti iznose od 90 N do 556N

**Tablica 3. Secifikacije trenja između parova materijala [6]**

	Č-Al	Al-Al	Gumirana podloga	Titan-Al
Trenje	0,61	1,05-1,35	0,5	0,3-0,6

Sila pritezanja  $F_p$  dana je izrazom u nastavku:

$$F_p = \frac{F_r}{\mu} \quad (2)$$

Gdje je  $\mu$  trenje između čeljusti škripca, te ako se u izraz (2) uvrste sila rezanja i vrijednosti trenja za različite parove materijala iz Tablice 3. sila pritezanja može poprimiti iznose od 66,5N do 912 N.

### 3.2 Proračun parametra vretena

Kako bi mogli odabir aktuatora potrebno je proračunati parametre vretena kojim se vrši prijenos sile na škripac

**Tablica 4. Specifikacije vretena[7]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Gustoća materijala	$\rho$	8000 kg / m <sup>3</sup>
Duljina	$l$	300 mm
Promjer	$D$	20 mm
Korak	$p$	4 mm
Kut nagiba boka	$\beta$	15°
Trenje u navojima	$\mu$	0,07
Srednji promjer	$D_2$	18 mm

Kut uspona  $\alpha$  dan je izrazom u nastavku prema:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{P}{D_2 \pi} \right) \quad (3)$$

Gdje je  $P$  uspon navoja,  $D_2$  srednji promjer vretena, te ako se u izraz (3) uvrste podaci iz Tablice 4. [7] kut uspona poprima vrijednost 4,046°.

Korigirani kut trenja  $\rho'$  dan je izrazom u nastavku:

$$\rho' = \tan^{-1} \left( \frac{\mu}{\cos \beta} \right) \quad (4)$$

Gdje je  $\mu$  trenje u navoju,  $\beta$  kut nagiba boka, ako se u izraz (4) uvrste podaci iz Tablice 4 [7] korigirani kut trenja poprima vrijednost 4,145°. Ako vrijedi  $\rho' \geq \alpha$  onda je vreteno samokočno.

Korisnost vretena  $\eta$  dana je izrazom u nastavku:

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \rho')} \quad (5)$$

Ako se u izraz (5) uvrste prethodno izračunate vrijednosti  $\alpha$  i  $\rho'$  korisnost poprima vrijednost 0,49 odnosno 49%.

Inercija vretena  $J_v$  dana je izrazom u nastavku:

$$J_v = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot l \cdot \rho \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (6)$$

Gdje je  $D$  vanjski promjer vretena,  $l$  duljina vretena,  $\rho$  gustoća materijala koji se koristi. Ako se u izraz (6) uvrste podaci iz Tablice 4. inercija vretena poprima vrijednost  $7,5398 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$ .

### 3.3 Proračun momenta trenja na matici

Matica kliže po tijelu škripca te je potrebno napraviti kompenzaciju sile trenja i pretvoriti ga u moment trenja koji djeluje dodatno na aktuator:

**Tablica 5. Specifikacije matice**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Gustoća materijala	$\rho$	8000 kg / m <sup>3</sup>
Volumen	$V$	$5,8859 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
Faktor trenja	$\mu$	0,6

Težina matice  $F_m$  dana je izrazom u nastavku:

$$F_m = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g \quad (7)$$

Gdje je  $m$  masa matice,  $g$  gravitacijsko ubrzanje,  $V$  volumen matice,  $\rho$  gustoća materijala od kojeg je matica izrađena. Ako se izraz (7) uvrste podaci iz Tablice 5. težina matice poprima vrijednost 46,193 N. Normalna sila  $F_n$  djeluje suprotno težini te se sila trenja može izračunati sljedećim izrazom:

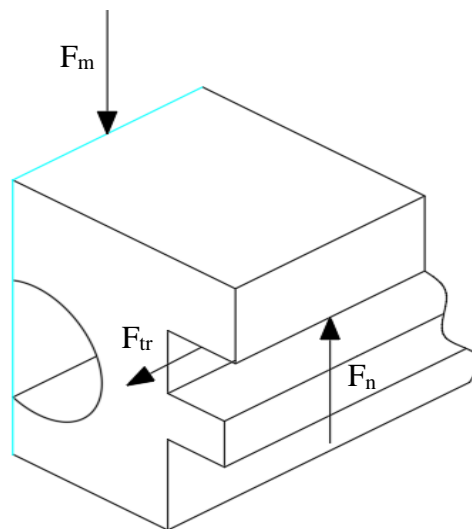
$$F_m = F_n \rightarrow F_{tr} = \mu \cdot F_n \quad (8)$$

Gdje je  $\mu$  trenje matice i tijela škripca, ako se u izraz (8) uvrsti podatak o trenju iz Tablice 5. sila trena poprima vrijednost 27,716 N

Moment trenja koji osjeti vreteno dan je sljedećim izrazom:

$$M_{tr} = F_{tr} \cdot \frac{D_2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_v} \quad (9)$$

Gdje je  $D_2$  srednji promjer vretena,  $\eta_v$  iskoristivost vretena, ako uvrstimo izračunate vrijednosti iz 3.3 i 3.2 u izraz (9) moment trenja poprima vrijednost 0,509 Nm. Slika 7. prikazuje skicu matice te sile koje su prethodno proračunate.



Slika 7 Sile na matici

### 3.4 Odabir aktuatora

Za ovaj škripac će se odabrati električni motor s reduktorom koji omogućava prijenos dovoljnog momenta kako bi osigurao obradak prilikom strojne obrade. Nadalje slijedi izraz za zbroj svih momenata koji se javljaju tokom stezanja:

$$M_m = M_{tr} + F_p \cdot \frac{D_2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_v} \quad (10)$$

Ako se odabere maksimalna sila pritezanja  $F_p$  proračunata u 3.1 moment i uvrsti u izraz (10)  $M_m$  poprima vrijednost 16,1 Nm.

Odabran je motor sljedećih specifikacija :



Tablica 6. Specifikacije DC elektromotora [8]

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Nazivna snaga	$P$	800 W
Nazivni napon	$U$	48 V DC
Nazivna struja	$I$	22 A
Nazivni moment	$M$	5 Nm
Nazivna brzina	$n$	1500 min <sup>-1</sup>
Armaturni otpor	$R_A$	0,11Ω
Armaturni induktivitet	$L_A$	50 μH
Inercija	$J$	740 · 10 <sup>-6</sup> Kgm <sup>2</sup>
Konstanta momenta	$K_m$	0,23 Nm/A

Iz specifikacija je vidljivo da sam motor nije dovoljno snažan, pa će se koristiti reduktor kako bi povećao moment vretena, posljedica dodavanja reduktora je ta da će se manjiti brzina sustava.

### 3.4 Proračun brzine

Brzina pomaka čeljusti škripca, može se izračunati iz parametra motora, vretena i reduktora nadalje slijedi izraz za brzinu:

$$v = \frac{n \cdot P}{60 \cdot i} \quad (11)$$

Gdje je  $n$  broj okretaja elektromotora,  $P$  uspon vretena,  $i$  prijenosni omjer reduktora, ako se u izraz (11) uvrste vrijednosti iz Tablice 7, Tablice 6. i Tablice 5. maksimalna brzina čeljusti škripca poprima vrijednost 17mm/s.

Tablica 7. Specifikacije reduktora [9]

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Prijenosni omjer	$i$	6
Inercija	$J_R$	110 · 10 <sup>-6</sup> Kgm <sup>2</sup>

## 4. MODELIRANJE REGULACIJSKOG KRUGA

Regulacija DC motora koristi se za kontrolu položaja, brzine i momenta kako bi se postigao precizan i stabilan rad. U svrhu simulacije regulacije DC motora potrebno je modelirati dinamiku motora, te je linearizirati odnosno prebaciti u donje S područje. Koristit će se kaskadna struktura regulacije, kod kojeg nadređeni regulatori zadaju referentne veličine podređenim regulatorima [14].

### 4.1 Matematički model DC elektro motora

Primjenom osnovnih fizikalnih zakona mogu se izvesti diferencijalne jednačbe ponašanja elektromotora kao što slijedi:

Iz II. Kirchhoff-ovog zakona sijedi izraz za napon:

$$U_A(t) = e(t) + R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} \quad (12)$$

Gdje je  $e(t)$  inducirani napon namotaja elektromotora,  $R_A$  otpor armature,  $i_A(t)$  struja armature,  $L_A$  induktivitet armature.

Iz Faraday-evog zakona slijedi izraz za inducirani napon namotaja elektromotra:

$$e(t) = K_E \phi n(t) \quad (13)$$

Gdje je  $K_E$  konstanta elektromotornog napona,  $\phi$  magnetski tok,  $n(t)$  broj okretaja.

Inducirani napon konstantnog magnetskog toka možemo jednostavnije zapisati kao što slijedi:

$$e(t) = K_e \omega(t) \quad (14)$$

Gdje je  $K_e$  konstanta elektromotornog napona,  $\omega(t)$  kutna brzina.

Jednadžba momenta motora može se zapisati:

$$m(t) = K_m i_A(t) \quad (15)$$

Gdje je  $K_m$  konstanta momenta,  $i_A(t)$  struja armature.

Iz II. Newton-ovog zakona slijedi izraz:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = m(t) - m_t(t) \quad (16)$$

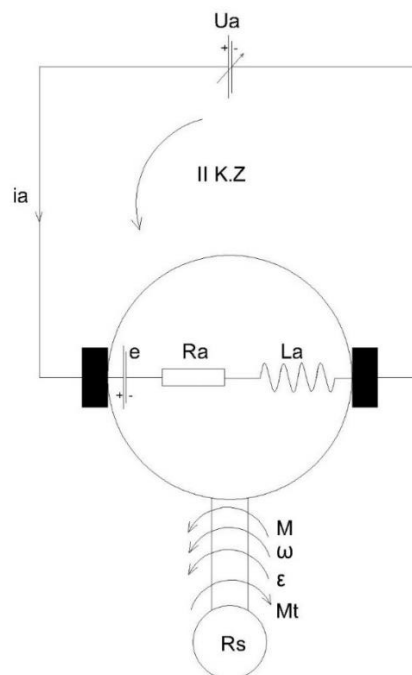
Gdje je  $J$  inercija rotora,  $\omega(t)$  kutna brzina,  $m(t)$  moment motora,  $m_t(t)$  moment tereta.

Deriviranjem zakreta motora dobiva se sljedeći izraz:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \omega(t) \quad (17)$$

Gdje je  $\omega(t)$  kutna brzina,  $\varepsilon(t)$  zakret motora.

Slika 8. prikazuje shemu DC elektromotora za kojeg su izvedeni prethodni izrazi



**Slika 8. Shema DC elektromotora**

### 4.1.1 Prebacivanje u donje s područje

Kako bi prebacili iz gornjeg (t) područja u donje (s) potrebno je koristiti Laplace-ovu transformaciju. Koristeći izvedene izraze za matematički model motora iz 4.1 slijede izrazi:

$$U_A(t) = e(t) + R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} / \mathcal{L} \quad (18)$$

$$U_A(s) = e(s) + R_A i_A(s) + L_A s i_A(s) \quad (19)$$

Sređivanjem izraza (18) i (19) dobiju sljedeći izrazi:

$$i_A(s) = \frac{U_A(s) - e(s)}{R_A + L_A s} = \frac{1}{R_A} \cdot \frac{U_A(s) - e(s)}{\frac{L_A}{R_A} s + 1} \quad (20)$$

$$\frac{i_A(s)}{U_A(s) - e(s)} = \frac{K_A}{T_A s + 1} \quad (21)$$

Gdje je  $K_A$  pojačanje armature,  $T_A$  vremenska konstanta armature, taj izraz će se koristiti kao aproksimacija DC elektromotora u simulaciji sustava.

Nadalje:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = m(t) - m_t(t) / \mathcal{L} \quad (22)$$

$$J s \omega(s) = m(s) - m_t(s) \quad (23)$$

Sređivanjem izraza (23) dobije se sljedeća relacija:

$$\omega(s) = \frac{m(s) - m_t(s)}{J s} \quad (24)$$

Nadalje:

$$e(t) = K_e \omega(t) / \mathcal{L} \quad (25)$$

$$e(s) = K_e \omega(s) \quad (26)$$

$$m(t) = K_m i_A(t) / \mathcal{L} \quad (27)$$

$$m(s) = K_m i_A(s) \quad (28)$$

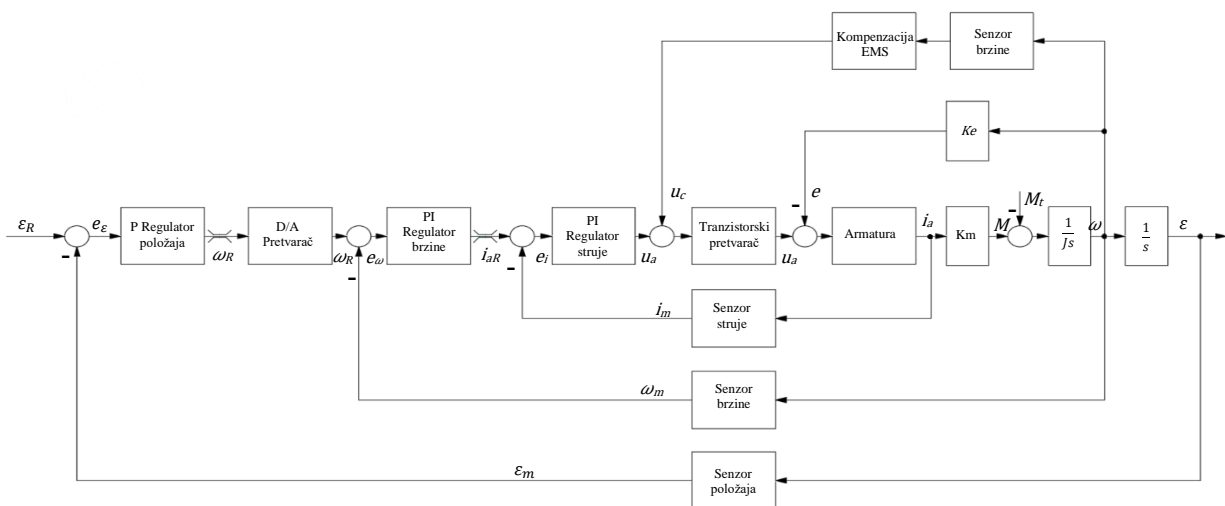
$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \omega(t)/\mathcal{L} \quad (29)$$

$$s\varepsilon(s) = \omega(s) \quad (30)$$

Nakon što su svi izrazi sređeni i prebačeni u s područje može se krenuti u daljnji pregled regulacijskog kruga i opisivanje ostalih komponenata koji će se nalaziti u istom.

## 4.2 Kaskadna struktura upravljanja

Slika 9. prikazuje kaskadnu strukturu upravljanja pozicijom, brzinom i strujom, regulacijski krug se sastoji od prijenosnih funkcija regulatora, mjernih članova, pretvarača, te prijenosne funkcije modela elektromotora koji se kontrolira. Unutar regulacijskog kruga se nalaze nadređeni i podređeni regulacijski krugovi. Nadređeni su oni koji daju referentne vrijednosti podređenim regulacijskim krugovima. Povratne grane sadrže mjerne članove koji mjere izlaznu vrijednost, dobivene izlazne vrijednosti oduzimaju se od referentnih koje su na ulazu u regulacijski krug. Oduzimanjem referentne i mjerene vrijednosti dobiva se greška koja ulazi u regulator koji nastoji tu grešku smanjiti na minimum. U direktnoj grani se nalaze i limitatori koji omogućuju limitiranje referentne vrijednosti te tako štite motor od pre velike struje.



Slika 9. Kaskadni regulacijski krug

### 4.2.1 Opis članova regulacijskog kruga

Svaki član regulacijskog kruga ima svoju dinamiku, ta dinamika je opisana diferencijalnom jednačbom koja se linearizira i svodi na prijenosnu funkciju koja ga dovoljno točno opisuje. U nastavku slijedi opis i objašnjenje svakog člana, te odabir pojačanja i vremenske konstante.

D/A pretvarač:

Digitalno-analogni pretvarač pretvara digitalne signale u obliku binarnog broja u analogni izlaz poput napona ili struje. Odabran je 12-bitni pretvornik koji je opisan sljedećim bitnim specifikacijama:

**Tablica 8. Specifikacije D/A pretvarača [10]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Ulazni signal	$N$	12Bit (0x000-0xFFF)
Izlazni signal	$U$	[-10,10] V
Greška napona	–	<0,5%

Prijenosna funkcija D/A pretvarača dana je sljedećim izrazom:

$$G_{DA} = \frac{K_{DA}}{\tau_{DA}s+1} \quad (31)$$

Gdje je  $K_{DA}$  pojačanje D/A pretvarača,  $\tau_{DA}$  vrijeme uzrokovanja. Pojačanje je definirano sljedećim izrazom:

$$K_{DA} = \frac{|-U|+U}{2^N} \quad (32)$$

Gdje je  $U$  izlazni napon pretvarača,  $N$  broj bitova, ako se uvrste podaci u izraz (32) iz Tablice 8. pojačanje iznosi  $4,8828 \cdot 10^{-3}$  V, a odabrano vrijeme uzrokovanja je 3ms.

## Tranzistorski pretvarač :

Tranzistorski pretvarač koristi tranzistore koje djeluju kao sklopke koje služe za kontrolu protoka struje, što omogućuje preciznu regulaciju izlaznog napona. Ima više vrsta tranzistorskih pretvarača, kao što su inverter, AC-DC, DC-DC, te frekventni pretvarač. Vrsta pretvarača se odabire prema zahtjevu sustava u kojem se koristi. Za sustav regulacije DC motora koristit će se DC-DC pretvarač koji je opisan sljedećim specifikacijama.

**Tablica 9. Specifikacije tranzistorskog pretvarača [11]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Napon međukruga	$U_b$	48V
Ulazni napon	$u$	[-5,5] V
Prekidačka frekvencija	$f_{ch}$	4kHz

Prijenosna funkcija tranzistorskog pretvarača dana je sljedećim izrazom:

$$G_{ch} = \frac{K_{ch}}{\tau_{ch}s+1} \quad (33)$$

Gdje je  $K_{ch}$  pojačanje pretvarača,  $\tau_{ch}$  vrijeme okidanja tranzistora, pojačanje i vrijeme okidanja dani su sljedećim izrazima:

$$K_{ch} = \frac{2U_b}{\Delta u} \quad (34)$$

$$\tau_{ch} = \frac{1}{f_{ch}} \quad (35)$$

Gdje je u izrazu (34)  $U_b$  napon međukruga,  $\Delta u$  razlika ulaznog napona, a u izrazu (35)  $f_{ch}$  prekidačka frekvencija. Ako se u izraz (34) uvrste podaci iz Tablice 9. pojačanje poprima vrijednost 9,6 i ako se u izraz (35) uvrste podaci iz Tablice 9. dobije se vrijeme uzrokovanja  $25\mu s$ .

Armatura :

Da bi regulacijski krug bio ispitan potrebno je napraviti prijenosnu funkciju armaturnog kruga, ona je izvedena iz dinamike elektromotora koja je detaljno prikazana u 4.1. Nadalje slijede podaci o odabranom DC motoru te izračun konstanti.

**Tablica 10. Potrebne specifikacije DC elektromotora za proračun parametara prijenosne funkcije [8]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Nazivni napon	$U$	48 V DC
Nazivna struja	$I$	22 A
Nazivna brzina	$n$	1500 min <sup>-1</sup>
Armaturni otpor	$R_A$	0,11Ω
Armaturni induktivitet	$L_A$	50 μH

Prijenosna funkcija DC elektromotora dana je sljedećim izrazom:

$$G_A = \frac{K_A}{T_A s + 1} \quad (36)$$

Za proračun pojačanja i vremenske konstante armature dani su sljedeći izrazi:

$$K_A = \frac{1}{R_A} \quad (37)$$

$$T_A = \frac{L_A}{R_A} \quad (38)$$

Gdje su  $R_A$  otpor armature,  $L_A$  induktivitet armature, ako se uvrste podaci iz Tablice 10. u izraz (37) pojačanje poprima vrijednost 0,0909A/V i ako se uvrste podaci iz Tablice 10. u izraz (38) konstanta vremena poprima vrijednost 454,55μs.

Konstanta elektromotornog napona dana je izrazom:

$$K_e = \frac{30 \cdot (U_A - I_A R_A)}{n \cdot \pi} \quad (39)$$



Gdje je  $U_A$  napon armature,  $I_A$  struja armature,  $R_A$  otpor armature,  $n$  broj okretaja elektromotora, ako se u izraz (39) uvrste podaci iz Tablice 10. konstanta elektromotornog napona poprima vrijednost  $0,29Vs/rad$ .

Mjerni član struje:

Za mjerenje struje na elektromotoru koristit će se senzor koji se zasniva na hall-ovom efektu, odnosno kada se električni naboj kreće kroz vodič, uz utjecaj magnetskog polja stvara se razlika potencijala odnosno Hall-ov napon, koji je proporcionalan struji. Nadalje će biti prikazane specifikacije senzora te prijenosna funkcija.

**Tablica 11. Specifikacije senzora struje [12]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Osjetljivost	$K_i$	40 mV/A
Opseg mjerenja	$I$	[-50, 50] A
Vremenska konstanta	$\tau_i$	0,75 ms

Prijenosna funkcija mjernog člana struje dana je sljedećim izrazom:

$$K_i = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (40)$$

Gdje je  $K_i$  pojačanje mjernog člana struje,  $\tau_i$  vremenska konstanta.

Mjerni član pozicije:

Pozicija će se mjeriti inkrementalnim enkoderom koji mjeri rotaciju vratila elektromotora, te taj mehanički pokret pretvara u impulse, nadalje slijedi njegova specifikacija:

**Tablica 12. Specifikacija senzora pozicije [8]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Rezolucija enkodera	$N$	2500 PPR

Konstanta pojačanja člana pozicije dana je sljedećim izrazom što je ujedino i prijenosna funkcija:

$$K_{\varepsilon} = \frac{4N}{2\pi} \quad (41)$$

Gdje je  $N$  rezolucija enkodera, te ako se uvrsti podatak iz Tablice 12. u izraz (41) pojačanje poprima vrijednost  $1591 \text{ rad}^{-1}$ .

Mjerni član brzine:

Brzina će se mjeriti digitalnim tahometrom, koji detektira izlaznu brzinu vratila te tu brzinu pretvara u električni signal. Nadalje će biti prikazana prijenosna funkcija tahometra te njegove specifikacije :

**Tablica 13. Specifikacije senzora brzine [14]**

Specifikacija	Oznaka	Vrijednost
Pojačanje tahometra	$K_{\omega}$	0.065 Vs/rad
Vremenska konstanta	$\tau_{\omega}$	2 ms

Prijenosna funkcija mjernog člana brzine dana je sljedećim izrazom:

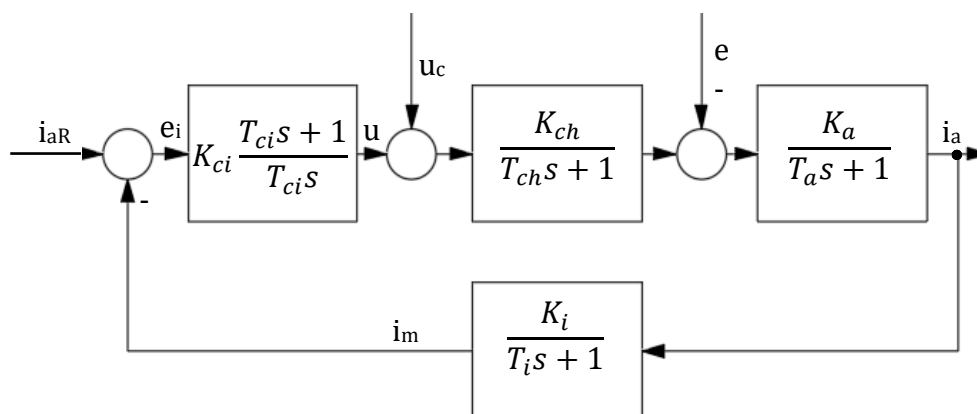
$$G_{\omega}(s) = \frac{K_{\omega}}{\tau_{\omega}s+1} \quad (42)$$

Gdje je  $K_{\omega}$  pojačanje tahometra,  $\tau_{\omega}$  vremenska konstanta.

## 4.2.2 Proračun regulatora

Slika 10. prikazuje regulator struje:

PI regulator struje, proračunava se tako da se izdvoji regulacijski krug struje, a elektromotorna sila (EMS) se smatra vanjskim poremećajem. Taj vanjski poremećaj će se kompenzirati EMS konpezatorom u slučaju brze promjene ili PI regulatorom u slučaju spore promjene.



Slika 10. Regulacijski krug struje

Za određivanje parametra regulatora prvo je potrebno izvesti prijenosnu funkciju otvorenog kruga prema [14] :

$$G_{oi} = \frac{i_{am}(s)}{e_i(s)} = K_{ci} \frac{(1+T_{ci}s)}{T_{ci}s} \frac{K_{ch}K_i}{(1+(T_{ch}+T_i)s)} \frac{K_a}{(T_a s+1)} \quad (43)$$

Nadalje možemo uvesti sljedeće supstitucije:

$$T_{\Sigma} = (T_{ch} + T_i) \quad (44)$$

$$T_{ci} = T_a \quad (45)$$

$$K_{oi} = K_{ci}K_{ch}K_iK_a / T_i \quad (46)$$

Uvođenjem (44), (45), (46) izraza prijenosna funkcija se može kraće zapisati :

$$G_{oi} = \frac{i_{am}(s)}{e_i(s)} = \frac{K_{oi}}{(T_{\Sigma}s+1)s} \quad (47)$$

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga:

$$G_{zi} = \frac{i_{am}(s)}{i_{aR}(s)} = \frac{G_{oi}}{1+G_{oi}} = \frac{\frac{K_{oi}}{(T_{\Sigma i} s + 1)s}}{1 + \frac{K_{oi}}{(T_{\Sigma i} s + 1)s}} = \frac{K_{oi}}{T_{\Sigma i} s^2 + s + K_{oi}} = \frac{1}{\frac{T_{\Sigma i} s^2 + 1}{K_{oi}} s + 1} \quad (48)$$

Pojačanje regulatora  $K_{ci}$  za optimalno prigušenje određuje se izjednačavanjem koeficijenata karakterističnog polinoma zatvorenog regulacijskog kruga s koeficijentima karakterističnog polinoma određenog prema optimumu dvostrukog odnosa.

Polinom dvostrukog odnosa dan je izrazom:

$$A(S) = D_n D_{n-1}^2 \dots D_2^{n-1} T_e^n s^n + D_{n-1} D_{n-2}^2 \dots D_2^{n-2} T_e^{n-1} s^{n-1} + \dots + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (49)$$

Karakterističan polinom drugog reda može se zapisati:

$$G_{ei} = \frac{1}{D_2 T_{ei}^2 s^2 + T_{ei} s + 1} \quad (50)$$

Izjednačivanjem izraza (49) i (50) dobiju se sljedeći sustav jednažbi:

$$\frac{T_{\Sigma i}}{K_{oi}} = D_2 T_{ei}^2 \quad (51)$$

$$T_{ei} = \frac{1}{K_{oi}} \quad (52)$$

Daljnjim sređivanjem izraza dobije se (51), (52), te (46) dobiju se konačni izrazi za pojačanje te nadomjesnog pojačanja i vremenske konstante regulatora:

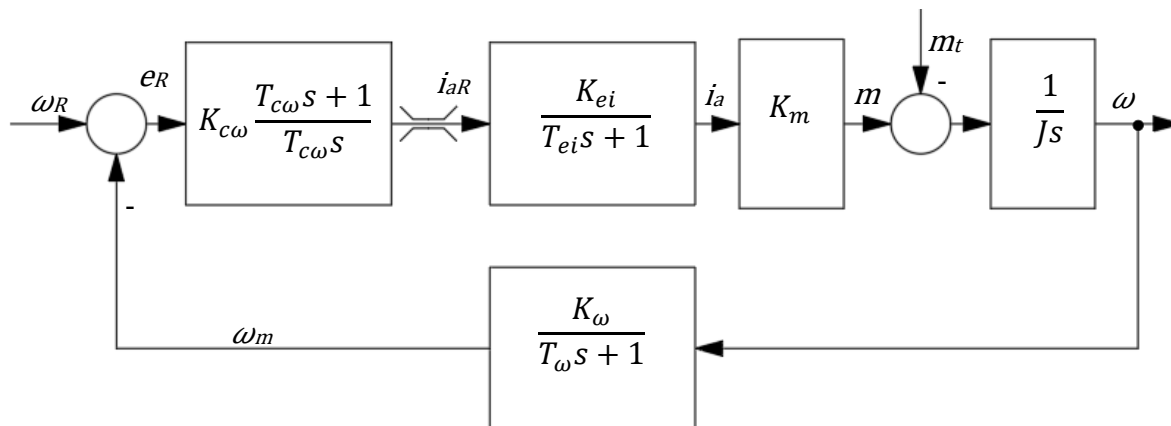
$$K_{ci} = \frac{D_2}{K_{ch} K_i K_a} \quad (53)$$

$$T_{ei} = \frac{T_{\Sigma i}}{D_2} \quad (54)$$

Karakteristični odnosi će biti postavljeni na 0,5 kako bi se dobio kvazi-aperiodski odziv sa 6% nadvišenja ( $D_i = 0,5$ ) [14].

## Regulator brzine

PI regulator brzine, proračunava se tako da se regulacijski krug struje svede na PT1 član, izdvoji se regulacijski krug brzine zajedno s PT1 članom regulacije struje kao što prikazuje slika 11.



Slika 11. Regulacijski krug brzine

Za određivanje parametra regulatora prvo je potrebno izvesti prijenosnu funkciju otvorenog kruga prema [14] :

$$G_{O\omega} = \frac{\omega_m(s)}{e_\omega(s)} = K_{O\omega} \frac{(1+T_{c\omega}s)}{s^2(T_{ei}s+1)(T_\omega s+1)} \quad (55)$$

Pojačanje otvorenog regulacijskog kruga dan je izrazom:

$$K_{O\omega} = \frac{K_{c\omega} K_\omega K_m}{T_{c\omega} K_i J} \quad (56)$$

Uvodi se supstitucija koja se smije uvesti zbog brze dinamike struje armature i mjernog člana struje, a dana je izrazom:

$$T_{\Sigma\omega} = T_{ei} + T_\omega \quad (57)$$

Izraz omogućuje jednostavniji zapis prijenosne funkcije otvorenog kruga:

$$G_{O\omega} = K_{O\omega} \frac{T_{c\omega}s+1}{s^2(T_{\Sigma\omega}s+1)} \quad (58)$$

Iz čega slijedi uvjet stabilnosti dan izrazom:

$$T_{\Sigma\omega} < T_{c\omega} \quad (59)$$

Nadalje slijedi izraz za prijenosna funkciju zatvorenog kruga:

$$G_{z\omega} = \frac{\omega_m(s)}{\omega_R(s)} = \frac{G_{o\omega}}{1+G_{o\omega}} = \frac{K_{o\omega} \frac{T_{c\omega}s+1}{s^2(T_{\Sigma\omega}s+1)}}{1+K_{o\omega} \frac{T_{c\omega}s+1}{s^2(T_{\Sigma\omega}s+1)}} = \frac{(T_{c\omega}s+1)}{\frac{T_{\Sigma\omega}}{K_{o\omega}}s^3 + \frac{1}{K_{o\omega}}s^2 + T_{c\omega}s+1} \quad (60)$$

Pojačanje regulatora  $K_{c\omega}$  za optimalno prigušenje određuje se izjednačavanjem koeficijenata karakterističnog polinoma zatvorenog regulacijskog kruga s koeficijentima karakterističnog polinoma određenog prema optimumu dvostrukog odnosa.

Polinom dvostrukog odnosa trećeg reda dan je izrazom:

$$A_m(s) = D_3 D_2^2 T_e^3 s^3 + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (61)$$

Izjednačivanjem izraza (60) i (61) dobiju se sljedeći sustav jednadžbi:

$$T_{c\omega} = T_e \quad (62)$$

$$\frac{1}{K_{o\omega}} = D_2 T_e^2 = D_2 T_{c\omega}^2 \quad (63)$$

$$\frac{T_{\Sigma\omega}}{K_{o\omega}} = D_3 D_2^2 T_e^3 = D_3 D_2^2 T_{c\omega}^3 \quad (64)$$

Dijeljenjem izraza (64) sa (63) dobije se vremenska konstanta regulatora:

$$T_{c\omega} = T_e = \frac{T_{\Sigma\omega}}{D_2 D_3} \quad (65)$$

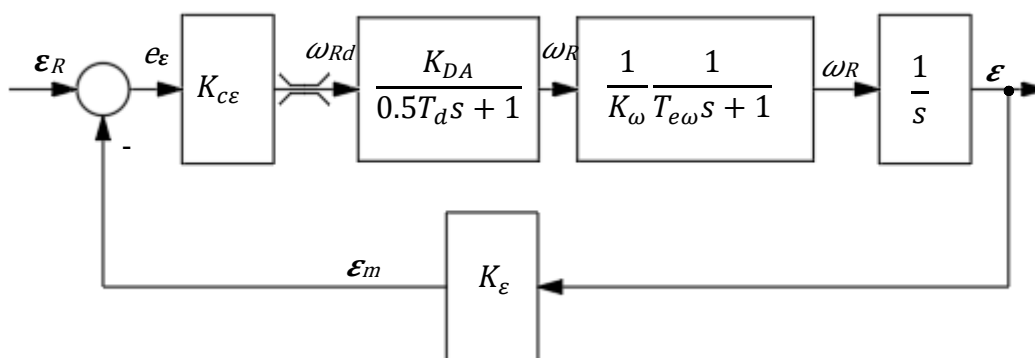
Kombiniranjem izraza (63) i (65) slijedi izraz za pojačanje regulatora:

$$K_{c\omega} = \frac{D_3 K_i J}{T_{\Sigma\omega} K_\omega K_m} \quad (66)$$

Karakteristični odnosi će biti postavljeni na 0,5 kako bi se dobio kvazi-aperiodski odziv sa 6% nadvišenja ( $D_i = 0,5$ ) [14].

Regulator položaja

PI regulator položaja, proračunava se tako da se regulacijski krug brzine svede na P1 član, izdvoji se regulacijski krug položaja zajedno s P1 članom regulacije brzine kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Regulacijski krug položaja

Prijenosna funkcija otvorenog kruga prema [14]:

$$G_{o\varepsilon} = \frac{\varepsilon_m(s)}{e_\varepsilon(s)} = \frac{K_{o\varepsilon}}{s(0,5T_d s + 1)(T_{e\omega} s + 1)} \quad (67)$$

Pojačanje otvorenog kruga regulacije dan je izrazom:

$$K_{o\varepsilon} = K_{c\varepsilon} \frac{K_{DA} K_\varepsilon}{K_\omega} \quad (68)$$

Uvodi se supstitucija dana izrazom:

$$T_{\Sigma\varepsilon} = 0,5T_d + T_{e\omega} \quad (69)$$

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga:

$$G_{z\varepsilon} = \frac{\varepsilon_m(s)}{\varepsilon_R(s)} = \frac{G_{o\varepsilon}}{1+G_{o\varepsilon}} = \frac{K_{o\varepsilon}}{T_{\Sigma\varepsilon}s^2+s+K_{o\varepsilon}} = \frac{1}{\frac{T_{\Sigma\varepsilon}}{K_{o\varepsilon}}s^2+\frac{1}{K_{o\varepsilon}}s+1} \quad (70)$$

Polinom dvostrukog odnosa drugog reda dan je izrazom:

$$A_m(s) = D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (71)$$

Izjednačavanjem izraza dobije se sljedeći sustav jednažbi:

$$T_{e\varepsilon} = \frac{1}{K_{o\varepsilon}} \quad (72)$$

$$\frac{T_{\Sigma\varepsilon}}{K_{o\varepsilon}} = D_2 T_e^2 \quad (73)$$

Daljnijm djeljenjem izraza (73) sa (72) dobije se izraz za vremensku konstantu regulatora:

$$T_e = \frac{T_{\Sigma\varepsilon}}{D_2} \quad (74)$$

Kombiniranjem izraza (68), (72), (73) slijedi izraz za pojačanje regulatora:

$$K_{c\varepsilon} = \frac{K_{\omega}}{K_{DA} K_{\varepsilon}} \frac{D_2}{T_{\Sigma\varepsilon}} \quad (75)$$

Karakteristični odnosi će biti postavljeni na 0,35 kako bi se dobio aperiodski odziv bez nadvišenja ( $D_i=0,35$ ) [14].



## 5. SIMULACIJA SUSTAVA

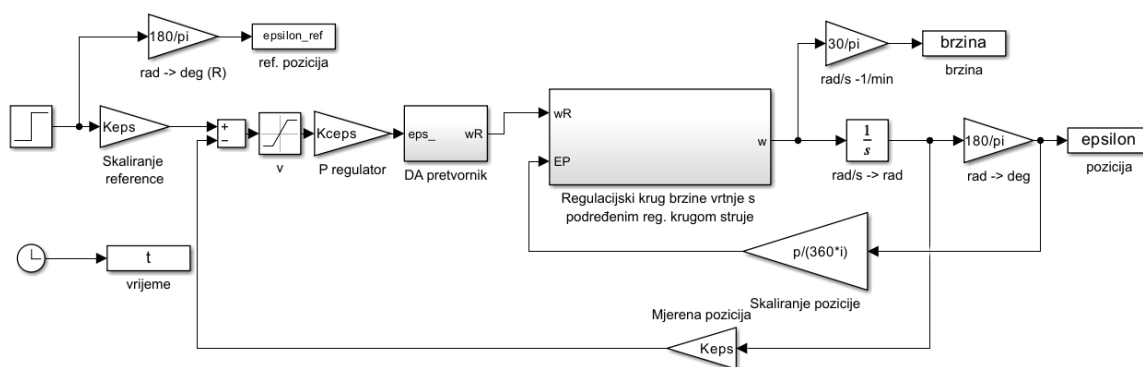
U radu je nakon modeliranja sustava i određivanja parametra regulacijskog kruga provedena simulacija ponašanja sustava za različite ulazne podatke. Simulacija je provedena u programskom paketu Matlab Simulink.

### 5.1 Simulink model regulacijskog kruga

Regulacijski krug je kaskadne strukture, pa tako ima nadređene i podređene regulacijske krugove. Model je sastavljen tako da se svaki regulacijski krug nalazi u novom podsustavu. Kako bi se što jasnije prikazao Simulink model, svaki regulacijski krug će se prikazati zasebno, redoslijedom od nadređenog prema podređenom.

#### 5.1.1 Regulacijski krug pozicije

Ulazni parametar je skokovita promjena pozicije od koje se oduzima mjerena pozicija, te se tako stvara greška koja ulazi u P regulator položaja koji nastoji tu grešku smanjiti na minimum. U regulacijski krug položaja dodatno je dodan graničnik „V“ koji omogućuje postavljanje brzine kojom će škripac doći do zadanog položaja, da taj graničnik nije postavljen regulator bi nastojao što brže postići položaj. Slika 13. prikazuje regulacijski krug pozicije.

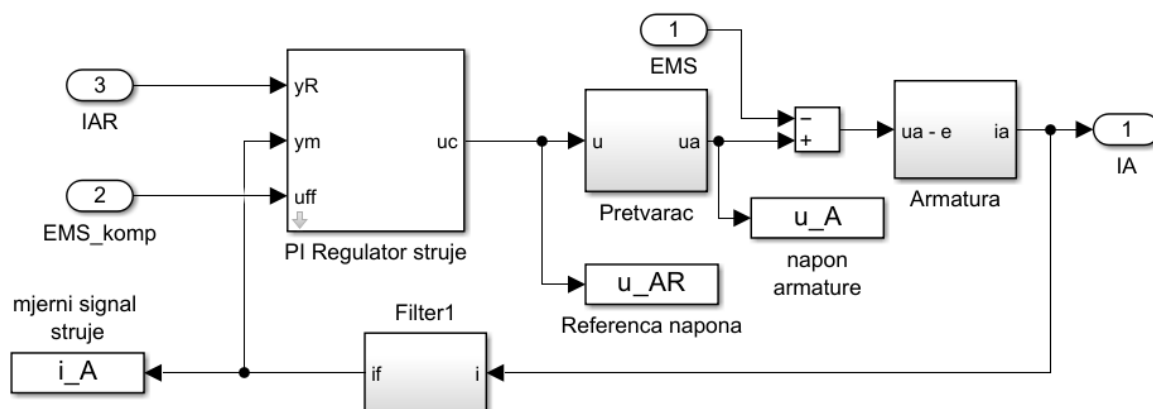


Slika 13. Simulink regulacijski krug položaja



### 5.1.3 Regulacijski krug struje

Regulacija struje ima brzu dinamiku pa je zato postavljena kao zadnja u kaskadi. Brza dinamika omogućava brzo podešavanje izlaznih vrijednosti, čime se dodatno osigurava stabilnost sustava, smanjuju se oscilacije i brzo se ispravlja greška regulacije. Dodatno služi kao zaštita cijelog sustava od visokih vrijednosti struje. Slika 15. prikazuje regulacijski krug struje.



Slika 15. Simulink regulacijski krug struje

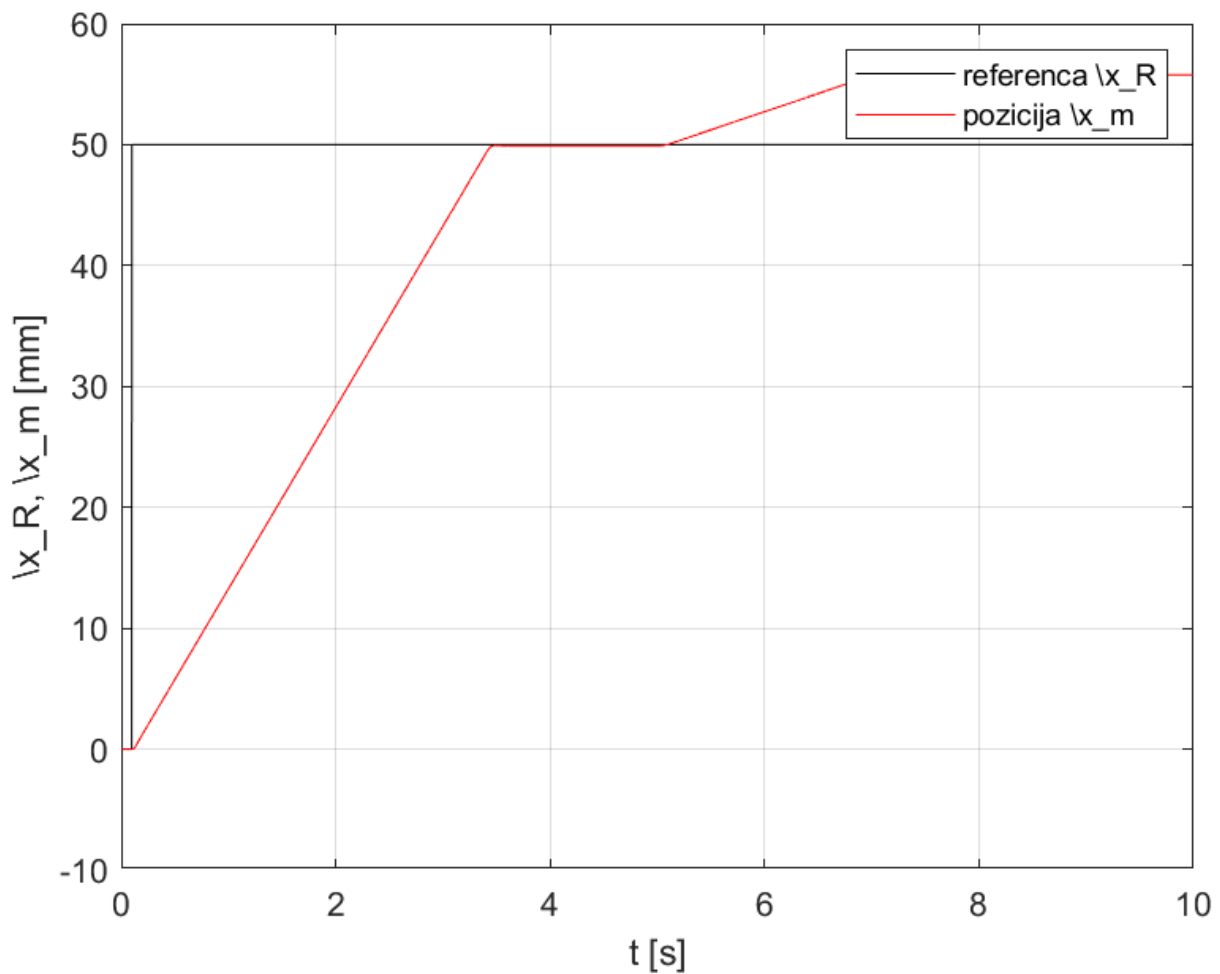
## 5.2 Odziv sustava na ulazne vrijednosti

Odzivi sustava bit će prikazani za sljedeće vrijednosti ulaza:

Tablica 14. Ulazni podaci za simulaciju

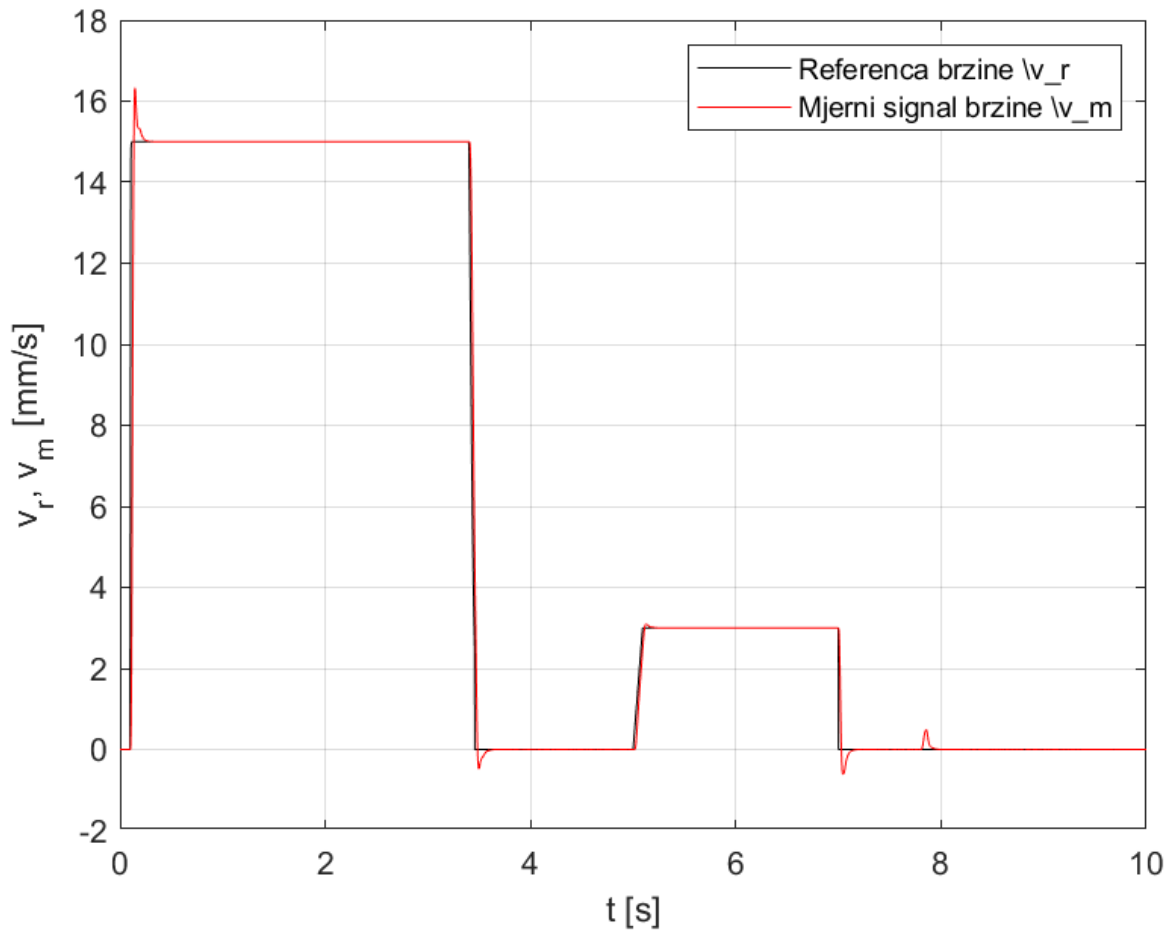
Ulaz	Oznaka	Vrijednost
Položaj	$\varepsilon$	50 mm
Brzina	v	15 mm/s
Sila	Fp	300 N

Slika 16. prikazuje odziv položaja, te referencu koju treba pratiti, na slici je vidljivo da sustav aperiodski prati referencu bez nadvišenja, što prikazuje stabilnost i točnost sustava. Vidljivo je da nekog vremena opet počinje rasti i da prelazi referencu, to se događa zato što više nije u režimu regulacije položaja nego se približava obratku kojeg se steže, vidljivo je da nagib rasta manji što ukazuje na manju brzinu prilazjenja.



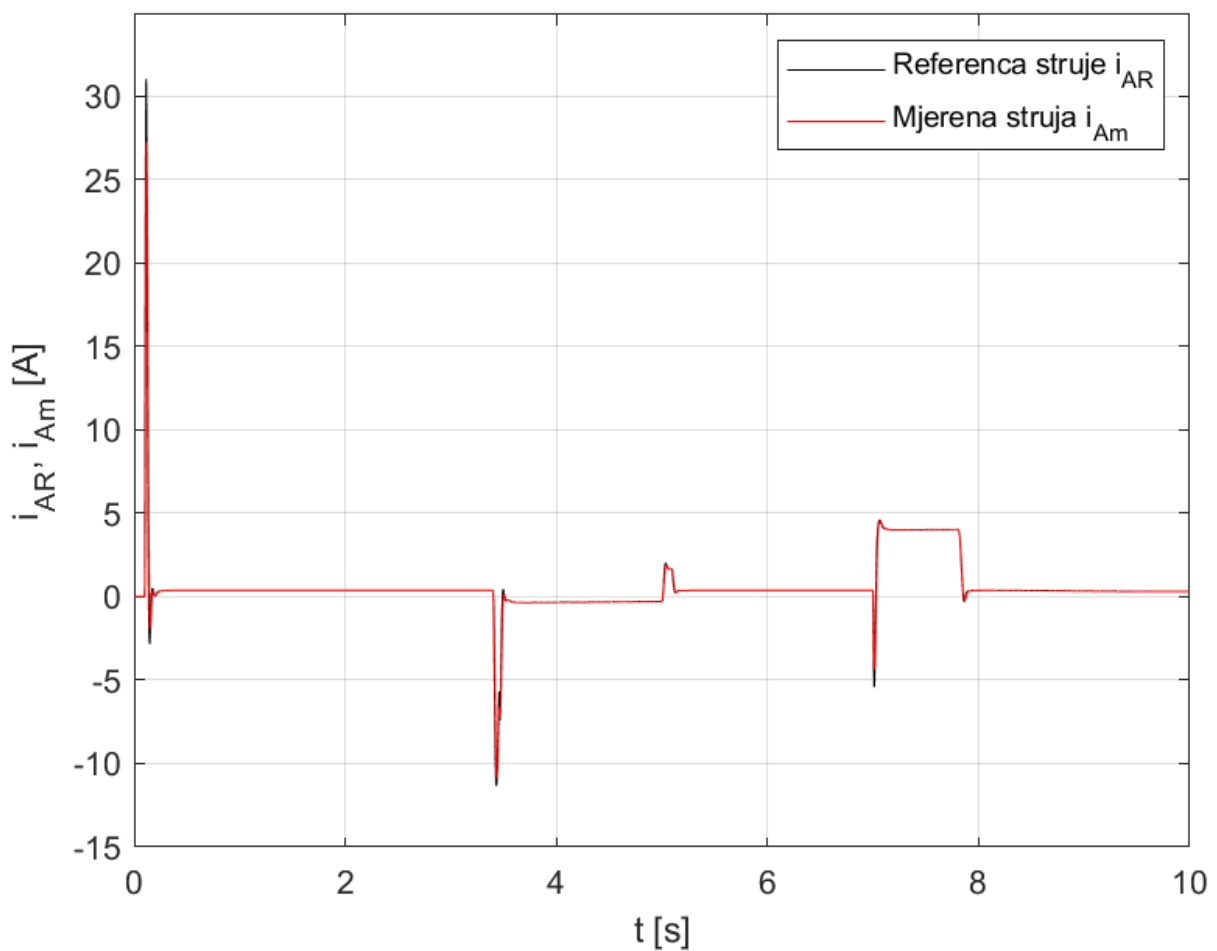
Slika 16. Odziv pozicije

Slika 17. prikazuje odziv brzine na zadani ulaz  $u$  [mm/s], vidljivo je da ima manjih nadvišenja, a izlaz brzine vjerno prati referencu. Brzina postiže zadanu vrijednost, te nakon nekog vremena se prebaci na brzinu prilaznja komadu koja se ne zadaje kao ulazni podatak nego je predefinicirana, brzina je manja zato što čeljusti škripca trebaju proći manji put pa da ne dođe do udara u komad.



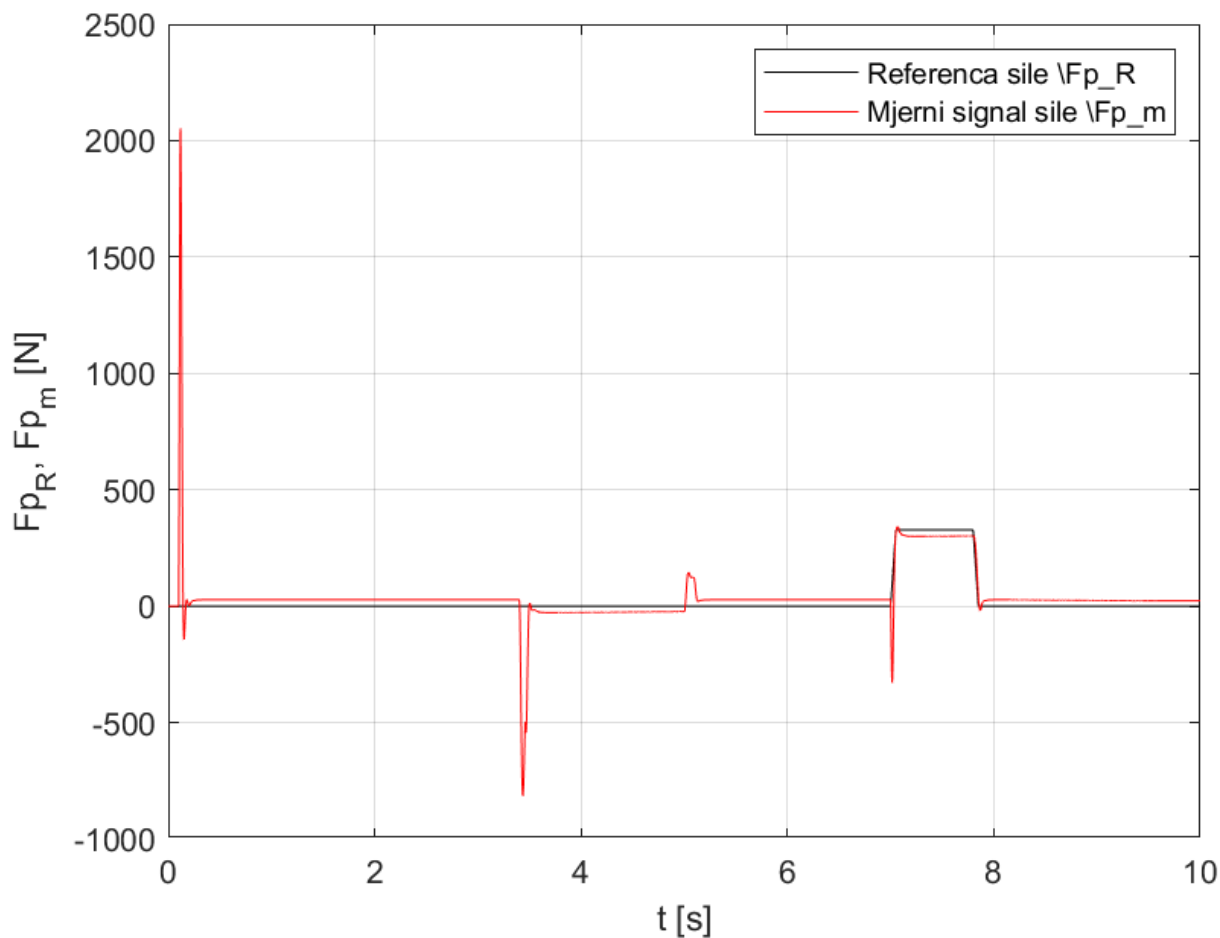
Slika 17. Odziv brzine

Slika 18. prikazuje odziv struje, te referencu struje, struja na početku naglo poraste kako bi se motor pokrenuo te postigao brzinu koja je zadana, zatim padne na vrijednost struje koja pokriva trenje. Nakon što je škripac dostigao zadanu poziciju, struja naglo pada i odlazi u minus zato što se događa kočenje koje usporava motor, potom opet naraste kako bi dostigao sporu brzinu, na kraju dolazi nailazi na zadanu silu koju treba ostvariti na izlazu škripca te struja opet poraste i te na kraju padne i tu je kraj procesa, struja slobodno padne zato što je škripac samokočan te kada postigne zadanu silu nema potrebe više za radom elektromotora.



Slika 18. Odziv struje

Slika 19. prikazuje odziv sile na zadani ulaz sile u [N], Slika je slična prethodnoj samo što ovdje nema reference struje nego profil sile koji je potreban pratiti, moment motora varira kroz proces, ali kada dođe do potrebe za ulaznom silom, moment na motoru poraste, a kako je moment proporcionalan struji grafovi moraju biti slični samo drugačije skalirani



Slika 19. Odziv sile

### 5.3 Osvrt na rezultate

Škripac ima nadvišenja prilikom dostizanja zadane vrijednosti brzine, što je posljedica biranje veće vrijednosti parametra dvostrukog odnosa, podizanjem te vrijednosti povećava se brzina odziva što pozitivno utječe na stabilnost sustava. Parametar dvostrukog odnosa pozicije je nešto manji što usporava sustav ali ne dolazi do nadvišenja, time se osigurava točnost i preciznost pozicioniranja. Sila pritezanja također dobro prati referentnu vrijednost što je i najbitnije, zato

što je cilj ovog rada osigurati obradak od pomicanja i deformacije prilikom pritezanja. Iz slike 19. vidljivo je da sila odstupa od referentne vrijednosti, to se događa zato što je u referentnu vrijednost uračunato trenje na matici proračunato prema 3.3, ali škripac dostiže silu koja mu je zadana. Struja također dobro prati referentnu vrijednost, te je vidljivo na slici 18. da u početku procesa struja prelazi nazivnu struju motora prema Tablici 8. što je dopustivo zato što je ta struja kratkotrajna te ne prelazi dvostruku vrijednost nazivne prema [14].



---

## **6. ZAKLJUČAK**

U radu je opisan problem stezanja osjetljivih predmeta za strojnu obradu pomoću steznog uređaja. Napravljen je pregled tržišta postojećih rješenja steznih uređaja na temelju kojeg su predložena tri koncepta. Napravljena je usporedna analiza te je odabran jedan koncept za kojeg je izvršen proračun sila i odabir aktuatora. Za navedeni koncept predložen je regulacijski sustav koji je simulacijski ispitan. Rezultati simulacije pokazuju da sustav dobro prati referentnu vrijednost, te ne oscilira u stacionarnom stanju. Ovim radom je dana ideja i jedan od načina kako bi se moglo pristupiti automatizaciji proizvodnog procesa strojne obrade, također takav pristup nije ograničen samo na automatizaciji škripca nego ima šire primjene u području automatizacije procesa.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://waykenrm.com> (20.08.2024)
- [2] <https://www.lightsoutmfg.com/products/p/rapid-vise-ur-kit> (20.08.2024)
- [3] <https://www.airvise.com/4-Table-Mount-Vise-p/av-t-4.htm> (20.08.2024)
- [4] <https://www.ok-vise.com/automated-clamping/> (20.08.2024)
- [5] <https://www.ingersoll-imc.de> (20.08.2024)
- [6] <https://www.ffri.hr> (20.08.2024)
- [7] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [8] <https://www.ato.com/800w-dc-servo-motor> (20.08.2024)
- [9] <https://stoeber.px.media/plk/Servo-Gear-Units.pdf> (20.08.2024)
- [10] <https://www.analog.com/en/products/ad5767.html> (20.08.2024)
- [11] <https://www.analog.com/en/products/adpl76030.html> (20.08.2024)
- [12] [https://www.best-microcontroller-projects.com/acs758.html?utm\\_content=cmp-true](https://www.best-microcontroller-projects.com/acs758.html?utm_content=cmp-true)  
(20.08.2024)
- [13] <https://www.picoelectronics.com> (20.08.2024)
- [14] Joško Deur, Predavanja Električni strojevi i pogoni, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [15] <https://b2b.partcommunity.com> (20.08.2024)

**PRILOZI****I. Matlab kod**

```

% ZAVRŠNI RAD Patrick Sever
% Fakultet strojarstva i brodogradnje
% Sveučilište u Zagrebu

clear
clc

%Podaci o motoru:
P = 800; % [W]
U = 48; % [V]
n =1500; % [1/min]
IA=22; % [A]
RA = 0.11; % [Ohm]
KA = 1/RA; % [1/Ohm]
LA = 50*10^(-6); % [H]
Ta = LA/RA; % [s]
Jm = 740*10^(-6); % [kg*m^2]
om = n*pi/30; % [rad/s]
M = 5; % [Nm]
Km = 0.23; % [Nm/A]
Ke = (30*(U-IA*RA))/(n*pi); % [Vs/rad]

%Podaci reduktora
i = 6; %Prijenosni omjer
Jr = 110*10^(-6); % [kg*m^2]

%Podaci vretena
D=18;%[mm]
Dv=20;%[mm]
p=4; %[mm]
L=300; %[mm]
ro=8000; %[kg/m^3]
Jv=(((Dv*10^(-3))^2)*pi)/4*(L*10^(-3)*ro*((Dv/2)*10^(-3))^2); %[kg*m^2]
ni=0.49;

%Ukupna inercija
J=Jv+Jr+Jm;

%Podaci chopera
fch = 4e3; % [Hz]
Kch = 9.6; % [V/V]
Tch = 1/fch;% [s]

%Parametri senzora struje
Ki = 0.04; % [V/A]
Ti = 0.75e-3; % [s]

%Parametri senzora brzine vrtnje
Kw = 0.065; % [Vs/rad]
Tw = 2e-3; % [s]

%Parametri DA pretvornika i mjernog clana pozicije
%Vrijeme uzorkovanja
Td = 3e-3; % [s]

%Pojacanje mjernog clana pozicije
Keps = 10000/2/pi; % [1/rad]

```

```

%Maksimalni napon DA pretvornika
UDA_max = 10.0; % [V]

%Pojacanje DA pretvornika
KDA = 4.8828*10^(-3); % [V]

% Parametri regulatora struje
% Karakteristicni odnos optimuma dv. odnosa
D2i = 0.5;
Tsigi = Ti + Tch;
Tci = Ta;
Kci = Tci/Tsigi*D2i/Kch/KA/Ki;
Tei = Tci/(Kci*Kch*KA*Ki);

% Proracun parametara regulatora brzine vrtnje
% Karakteristicni odnosi optimuma dvostrukog odnosa
D2w = 0.5; D3w = 0.5;
Tsigw = Tei + Tw;
Tcw = Tsigw/D2w/D3w;
Tew = Tcw;
Kcw = 1/(D2w*Tcw)*Ki*J/Kw/Km;

% Proracun parametara linearnog regulatora pozicije
% Karakteristicni odnos optimuma dvostrukog odnosa
D2e = 0.35;
Tsigew = Tew + Td/2;
Kceps = (D2e/Tsigew)*Kw/KDA/Keps;
Teeps = Tsigew/D2e;

% Limit napona choppera
Uch_limit = U;

% Limit struje
IAR_limit = 2*IA*Ki;

% EMS kompenzacija
Kcomp = Ke/Kch/Kw;

% Limit regulatora struje
u_max = Uch_limit/Kch;
u_min = -1.0*u_max;

% Pocetna brzina pogona
w0 = 0.0; % [rad/s]

% Pocetna pozicija pogona
epsilon0 = 0.0;

% Brzina prilska komadu:
v_2=3; %[mm/s]

fprintf(1, '\n\t Unesi iznos brzine v 0-17[mm/s]:\n\n');
fprintf(1, '\t\t'); speed = input(' v = '); fprintf(1, '\n');
if speed*p/(60*i)>17
    fprintf(1, '\n\t Maksimalna brzina je 17 [mm/s], upisi manju brzinu:\n\n');
    fprintf(1, '\t\t'); speed = input(' v = '); fprintf(1, '\n');
end

```

```

%Maksimalni napon DA pretvornika
UDA_max = 10.0; % [V]

%Pojacanje DA pretvornika
KDA = 4.8828*10^(-3); % [V]

% Parametri regulatora struje
% Karakteristicni odnos optimuma dv. odnosa
D2i = 0.5;
Tsigi = Ti + Tch;
Tci = Ta;
Kci = Tci/Tsigi*D2i/Kch/KA/Ki;
Tei = Tci/(Kci*Kch*KA*Ki);

% Proracun parametara regulatora brzine vrtnje
% Karakteristicni odnosi optimuma dvostrukog odnosa
D2w = 0.5; D3w = 0.5;
Tsigw = Tei + Tw;
Tcw = Tsigw/D2w/D3w;
Tew = Tcw;
Kcw = 1/(D2w*Tcw)*Ki*J/Kw/Km;

% Proracun parametara linearnog regulatora pozicije
% Karakteristicni odnos optimuma dvostrukog odnosa
D2e = 0.35;
Tsigew = Tew + Td/2;
Kceps = (D2e/Tsigew)*Kw/KDA/Keps;
Teeps = Tsigew/D2e;

% Limit napona choppera
Uch_limit = U;

% Limit struje
IAR_limit = 2*IA*Ki;

% EMS kompenzacija
Kcomp = Ke/Kch/Kw;

% Limit regulatora struje
u_max = Uch_limit/Kch;
u_min = -1.0*u_max;

% Pocetna brzina pogona
w0 = 0.0; % [rad/s]

% Pocetna pozicija pogona
epsilon0 = 0.0;

% Brzina prilska komadu:
v_2=3; %[mm/s]

fprintf(1,'\n\t Unesi iznos brzine v 0-17[mm/s]:\n\n');
fprintf(1,'\t\t');speed = input(' v = ')*i*60/p;fprintf(1,'\n');
if speed*p/(60*i)>17
    fprintf(1,'\n\t Maksimalna brzina je 17 [mm/s],upisi manju brzinu:\n\n')
    fprintf(1,'\t\t');speed = input(' v = ')*i*60/p;fprintf(1,'\n');
end

```

```
%axis([0 t_end min(epsilon)-10 max(epsilon)+10])

else

    figure(1),
    plot(t,p*epsilon_ref/(360*i),'k',t,p*epsilon/(360*i),'r'),grid on
    ylabel('\x_R, \x_m [mm]'),legend('referenca \x_R','pozicija \x_m'),xlabel('t [s]')

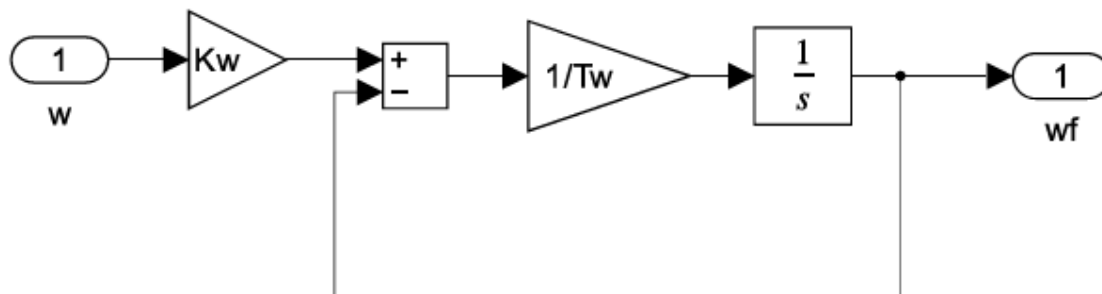
end

%Graf brzine
figure(2),
plot(t,omega_R*1.632358,'k',t,omega_m*1.632358,'r'),grid on
ylabel('v_r, v_m [mm/s]'),legend('Referenca brzine \v_r','Mjerni signal brzine \v_m'),xlabel('t [s]')

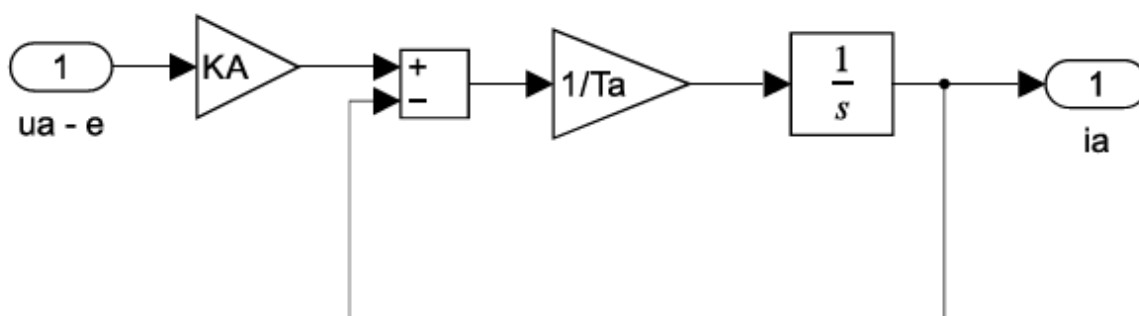
%Graf Struje
figure(3)
plot(t,i_AR/Ki,'k',t,i_A/Ki,'r'),grid on
ylabel('i_A_R, i_A_m [A]'),xlabel('t [s]'),legend('Referenca struje \i_A_R','Mjerena struja \i_A_m')

%Graf sile
figure(4),
plot(t,m_tereta*i*ni*2/(D*10^(-3)), 'k',t,m_motora*i*ni*2/(D*10^(-3)), 'r'),grid on
ylabel('Fp_R, Fp_m [N]'),legend('Referenca sile \Fp_R','Mjerni signal sile \Fp_m'),xlabel('t [s]')
```

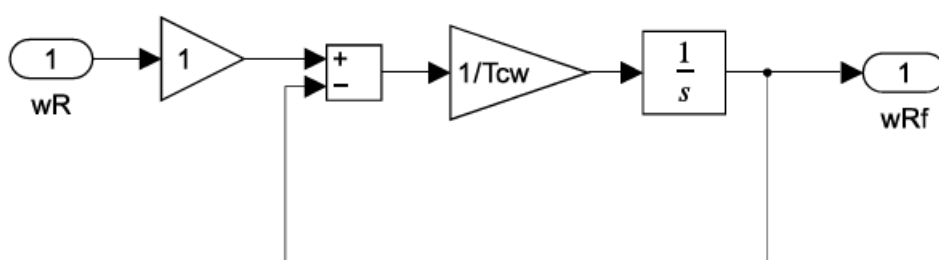
## II. Simulink podsustavi



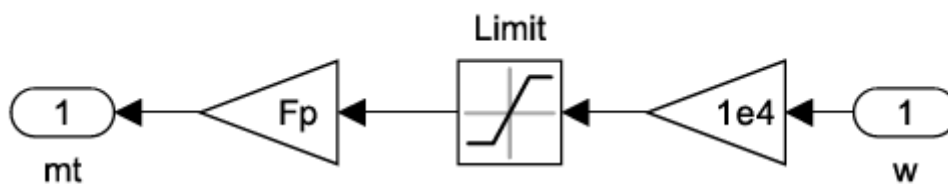
Slika 20. Senzor brzine



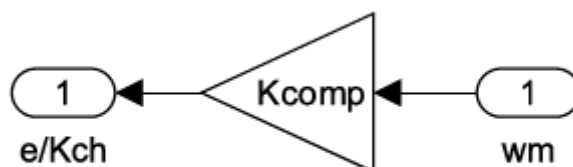
Slika 21. Armatura



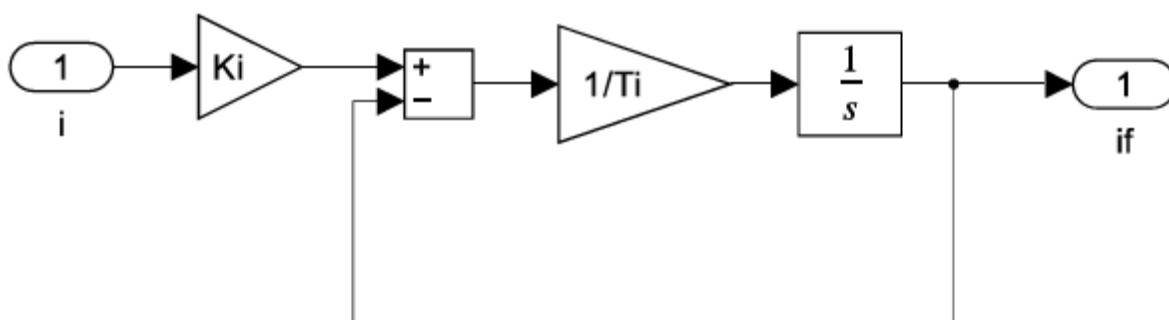
Slika 22. Prefiltar brzine



Slika 23. Moment trenja na matici

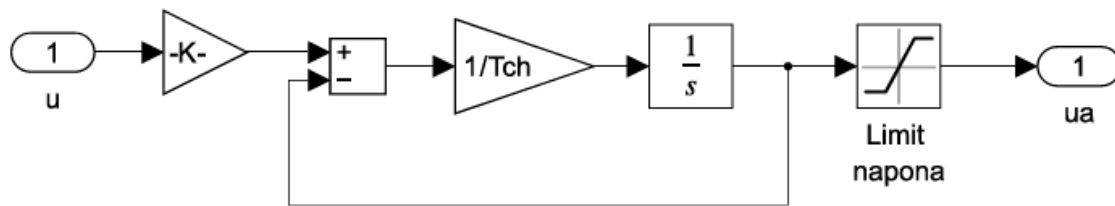


Slika 24. Kompenzacija EMS

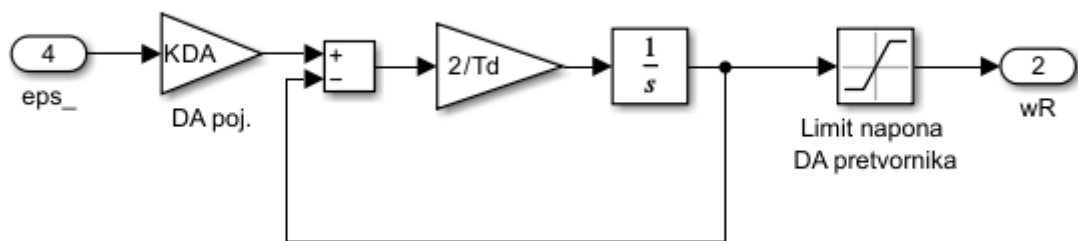


Slika 25. Senzor struje





Slika 26. Tranzistorski pretvarač



Slika 27. DA pretvarač