

Vježba br.4

Regulacija pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 -sinteza regulatora-



Upute za studente

Sadržaj:

1.	UVOD	2
2.	ZADACI ZA PRIPREMU	2
3.	LITERATURA	2
4.	POKUSI	3
4.1.	Pokus 1 : Određivanje parametara PV regulatora pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02	3
4.1.1.	Matematički model rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02	3
4.1.2.	Prikaz matematičkog modela SRV02 u Simulink okruženju	4
4.1.3.	Regulacijski zahtjevi	4
4.1.4.	Projektiranje PV regulatora pozicije	5
4.1.5.	Zadaci za izvještaj	6
4.2.	Pokus 2 : Simulacija kruga regulacije pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02	6
4.2.1.	Izrada simulacijskog modela unutar Simulink okruženja	7
4.2.2.	Zadaci za izvještaj	8
	DODATAK 1. – POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	9

1. Uvod

Vježba *Regulacija pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02-sinteza regulatora*-zamišljena je tako da studentima omogući:

- Određivanje matematičkog modela rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 iz zadanih zahtjeva
- Simulaciju matematičkog modela rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 unutar Simulink programskog okruženja
- Sintezu regulatora pozicije osovine rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 korištenjem Matlab funkcija. Postupak sinteze uključuje:
 - [projektiranje PV regulatora](#) pozicije osovine prema zadanim [regulacijskim zahtjevima](#) iznosa i vremena prvog nadvišenja
- Simulaciju kruga regulacije pozicije u Simulinku u svrhu provjere ispravnosti parametara regulatora dobivenih sintezom

2. Zadaci za pripremu

U svrhu pripreme za laboratorijsku vježbu potrebno je detaljno proučiti materijal „Upute za studente“ te odgovoriti na slijedeća pitanja:

1. Koji regulator se koristi za regulaciju pozicije *rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02*?
2. Zbog čega je izostavljeno regulacijsko djelovanje regulatora?
3. Čime bi rezultiralo postavljanje klasičnog PD regulatora?
4. Kako se na osnovu dobivenog odziva određuje nadvišenje σ_m i vrijeme prvog maksimuma t_p ?
5. Koji mjerni član se koristi pri regulaciji pozicije *rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02*?
6. Na koji način je moguće odrediti poziciju na osnovu izlaza iz mjernog člana (navesti izraz)?
7. Projektirati PV regulator pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 sa zahtjevima postavljenim u poglavlju [4.1.3](#). Prilikom određivanja parametara regulatora zanemaruje se filter u unutarnjoj povratnoj vezi.

Priprema je zajednička za vježbe 4 i 5.

3. Literatura

Za laboratorijsku vježbu se može koristiti slijedeća literatura:

- [1] [UPM 1503](#) pojačalo s napajanjem
- [2] [MultiQ-PCI Terminal Board](#) (TB) završna pločica za prihvatanje podataka (engl. *terminal board*)
- [3] [SRV02](#) elektromehanički rotacijski modul
- [4] [WinCon](#) programsko okruženje za rad u realnom vremenu

4. Pokusi

U sklopu ove laboratorijske vježbe izvode se dva pokusa. Pokusi obuhvaćaju proces sinteze regulatora pozicije korištenjem Matlab funkcija te simulaciju tako dobivenog regulatora.

4.1. Pokus 1 : Određivanje parametara PV regulatora pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02

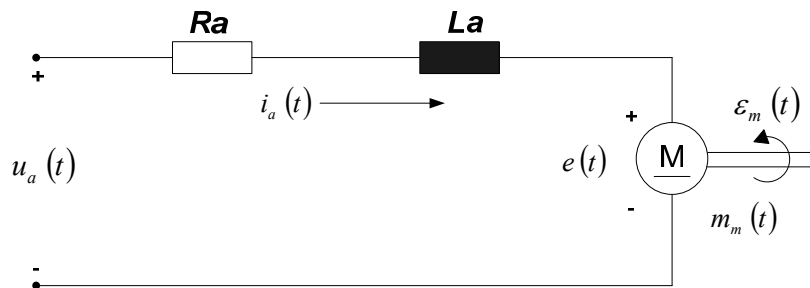
Zadatak je da se projektira regulator pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02, koji će zadovoljiti zadane regulacijske zahtjeve, poglavlje [4.1.3.](#)

4.1.1. Matematički model rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02

Za sintezu regulatora potreban je matematički model rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02. Za njega je potrebno poznavati zakone kinematike mehaničkog podsustava. Ovdje je prikazan skraćeni izvod matematičkog modela, a popis korištenih oznaka koje se pojavljuju u modelu nalazi se u dijelu teksta [Dodatak1-popis korištenih oznaka](#).

Koristeći Kirchhoffov zakon za električki model motora prikazan na sl.1., dobije se sljedeća naponska jednačba:

$$u_a - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt} - e = 0 \quad . \quad (4.1)$$



Sl. 1. Nadomjesna shema naponom upravljanih istosmjernog motora

Kako je $L_a \ll R_a$, zanemaruje se induktivitet armature motora te izraz (4.1) prelazi u oblik

$$i_a = \frac{u_a - e}{R_a} \quad . \quad (4.2)$$

Protuelektromotorna sila e (engl. *electromotive force*, emf) stvorena od strane motora, proporcionalna je brzini vrtnje osovine motora ω_m , pa slijedi:

$$i_a = \frac{u_a - k_e \frac{d\epsilon_m}{dt}}{R_a} \quad \left(\frac{d\epsilon_m}{dt} = \omega_m \right) \quad . \quad (4.3)$$

Primjenom drugog Newtonovog zakona o dinamičkoj ravnoteži momenata, za motor se dobije

$$J_m \frac{d^2 \epsilon_m}{dt^2} = m_m - \frac{m_t}{\eta_g K_g} \quad , \quad (4.4)$$

gdje $m_t/\eta_g K_g$ moment tereta reduciran na stranu motora, a η_g je korisnost zupčastog prijenosnika. Primjenom istog zakona, gibanje tereta se opisuje diferencijalnom jednačbom

$$J_t \frac{d^2 \varepsilon_t}{dt^2} = m_t - B_{eq} \frac{d\varepsilon_t}{dt}, \quad (4.5)$$

gdje je B_{eq} koeficijent viskoznog trenja (engl. *viscous damping*). Uvrštenjem jednadžbe (4.4) u (4.5), dobiva se:

$$J_t \frac{d^2 \varepsilon_t}{dt^2} = \eta_g K_g m_m - \eta_g K_g J_m \frac{d^2 \varepsilon_m}{dt^2} - B_{eq} \frac{d\varepsilon_t}{dt}. \quad (4.6)$$

Budući da je $\varepsilon_m = K_g \varepsilon_t$ i $m_m = \eta_m k_m i_a$ (gdje η_m predstavlja korisnost motora), jednadžba (4.6) se može napisati u sljedećem obliku:

$$J_t \frac{d^2 \varepsilon_t}{dt^2} + \eta_g K_g^2 J_m \frac{d^2 \varepsilon_t}{dt^2} + B_{eq} \frac{d\varepsilon_t}{dt} = \eta_g \eta_m K_g k_m i_a \quad (4.7)$$

Uvrštenjem jednadžbe (4.3) u (4.7), dobiva se tražena prijenosna funkcija

$$G'(s) = \frac{\varepsilon_t(s)}{u_a(s)} = \frac{\eta_g \eta_m k_m K_g}{J_{eq} R_a s^2 + (B_{eq} R_a + \eta_g \eta_m k_e k_m K_g^2) s}, \quad (4.8)$$

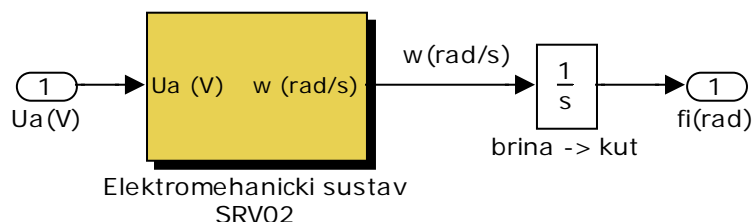
gdje je:

$$J_{eq} = J_t + \eta_g J_m K_g^2. \quad (4.9)$$

Izraz (4.9) predstavlja ukupni (ekvivalentni) moment inercije reduciran na stranu tereta.

4.1.2 Prikaz matematičkog modela SRV02 u Simulink okruženju

Zbog potreba simulacije, matematički model elektromehaničkog sustava SRV02 potrebno je prikazati u Simulink grafičkom okruženju pomoću odgovarajuće nadomjesne sheme. Promatranjem relacija (4.3), (4.4) i (4.5) te odabirom odgovarajućih blokova unutar Simulink biblioteke elemenata, dobiva se nadomjesni model prikazan na sl.2.



Sl. 2. Nadomjesni model elektromehaničkog sustava SRV02 načinjen u Simulink-u.

4.1.3. Regulacijski zahtjevi

Zadatak je projektirati sustav regulacije pozicije s ciljem upravljanja rotacijskim elektromehaničkim sustavom SRV02 sa sljedećim zahtjevima:

- Sustav treba imati nadvišenje manje od 5% ($\sigma_m = 0.05$).
- Vrijeme prvog maksimuma mora biti 100ms ($t_p = 0.100$).

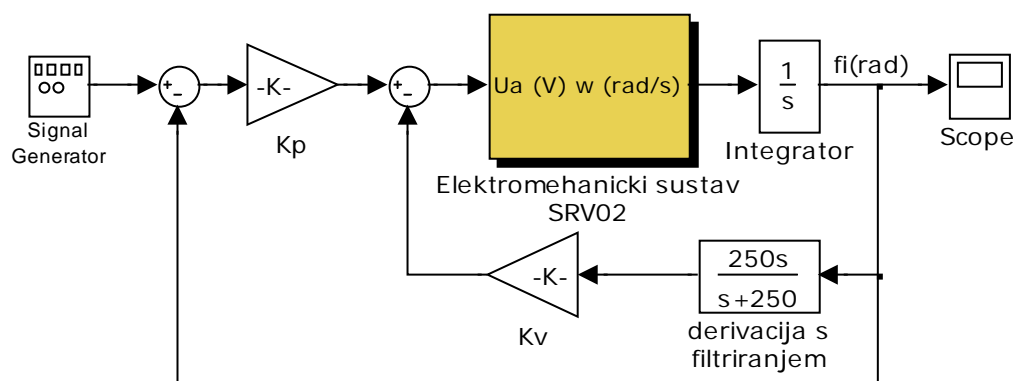
4.1.4. Projektiranje PV regulatora pozicije

Cilj ove vježbe jest projektiranje regulatora pozicije rotacijskog elektromehaničkog modula SRV02. Za razliku od vježbe br.2, integralno pojačanje regulatora ovdje se izostavlja jer, prema jednadžbi (4.8), u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga regulacije pozicije već postoji pol smješten u $s=0$. Budući da se statička pogreška na ovaj način eliminira a i zbog jednostavnosti u procesu sinteze regulatora, koriste se dvije najčešće inačice regulatora.

U klasičnom slučaju PD regulator ima oblik: $G(s) = K_p + K_d \cdot s$. Postavljanje takvog regulatora u direktnu granu rezultira pojavom neželjenih nula u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga. Posljedica jest povećanje složenosti sustava te samim time i teže određivanje parametara takvog regulatora.

Zbog navedenih ograničenja odabire se *regulator stanja* (engl. *state feedback controller*), tj. regulator koji koristi jedinstveni regulator (pozicije i brzine) s dostupnim (mjerljivim ili estimiranim) varijablama stanja sustava. Za ovaj slučaj to su pozicija i brzina (engl. *Position* and *Velocity*), pa se ovakav regulator stanja zove i **PV regulator**. Upravljački algoritam PV regulatora ima sljedeći oblik:

$$u_a = -K_p(\varepsilon_t - \varepsilon_d) - K_v \frac{d\varepsilon_t}{dt} \quad (4.10)$$



Sl.3. PV regulator za SRV02 modul

Cilj ovog pokusa je projektiranje regulatora koristeći prijenosnu funkciju drugog reda, čiji opći oblik glasi:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (4.11)$$

s karakterističnom jednadžbom:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0. \quad (4.12)$$

Na osnovi relacija (4.8) i (4.10) potrebno je odrediti prijenosnu funkciju zatvorenog kruga regulacije pozicije prikazanog na sl.2. Ona će biti oblika:

$$G(s) = \frac{\varepsilon_t(s)}{\varepsilon_d(s)} \quad (4.13)$$

Iz prijenosne funkcije zatvorenog kruga treba izdvojiti karakterističnu jednadžbu te je podesiti u oblik prikazan jednadžbom (4.11). Na osnovi karakteristične jednadžbe te zadanih kriterija potrebno je odrediti parametre PV regulatora (K_p i K_v). Za određivanje parametara regulatora potrebno je poznavati prirodnu frekvenciju ω_n te prigušenje ζ koji se određuju na osnovi zadanih kriterija traženog iznosa i vremena prvog maksimuma i to na sljedeći način:

- Nadvišenje u postocima σ_m računa se na osnovu prigušenja ζ kao

$$\sigma_m = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (4.14)$$

- Vrijeme prvog maksimuma računa se na osnovi prirodne frekvencije ω_n te prigušenja ζ kao

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4.15)$$

Koristeći relacije (4.14) i (4.15) te na temelju [regulacijskih zahtjeva](#) (zadani σ_m i t_p) određuju se ω_n i ζ . Svođenjem prijenosne funkcije zatvorenog kruga regulacije pozicije na oblik prikazan jednačbom (4.11) te određivanjem ω_n i ζ , određuju se parametri regulatora K_p i K_v .

4.1.5. Zadaci za izvještaj

Izvještaj o obavljenoj vježbi mora sadržavati:

- Cijeli postupak sinteze PV regulatora koji uključuje :
 - Određivanje ω_n i ζ iz zadanih zahtjeva za σ_m i t_p .
 - Određivanje prijenosne funkcije zatvorenog kruga regulacije pozicije.
 - Određivanje karakteristične jednačbe.
 - Određivanje parametara regulatora K_p i K_v
- Konačna zapažanja i zaključke te odgovore na slijedeća pitanja:
 - Što se dešava s ω_n kada se K_p povećava/smanjuje?
 - Što se dešava s ζ kada se povećava/smanjuje K_v i/ili K_p ?

Odgovori na ova pitanja trebaju biti kratki i jasni (ω_n (ζ) se smanjuje ili povećava).

4.2. Pokus 2 : Simulacija kruga regulacije pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02

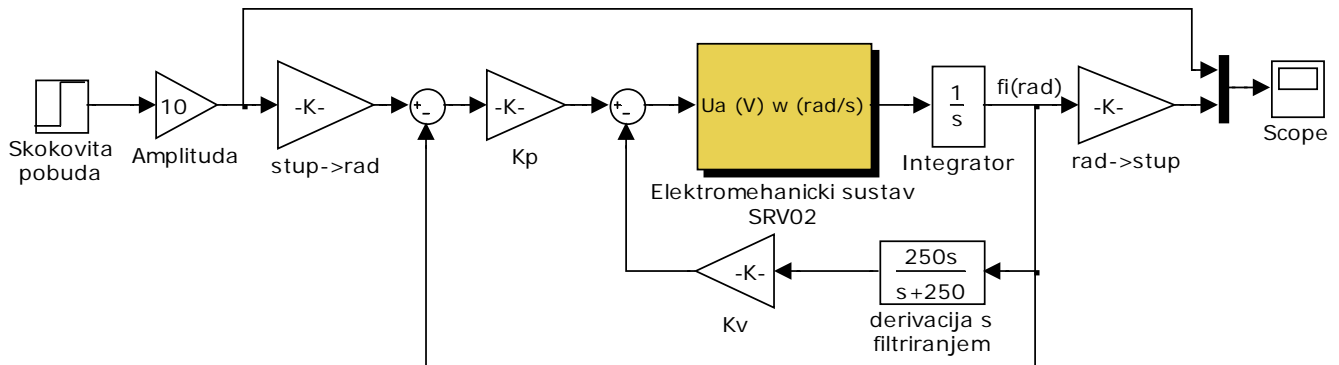
Nakon određivanja parametara regulatora potrebno je simulirati krug regulacije pozicije osovine rotacijskog elektromehaničkog modula SRV02, kako bi se potvrdilo da taj krug ispunjava postavljene kriterije u poglavlju [4.1.3](#). Zadatak je:

- U Simulink okruženju načiniti odgovarajući simulacijski model sustava regulacije pozicije rotacijskog elektromehaničkog modula SRV02.
- Snimiti karakteristične odzive na skokovitu pobudnu funkciju te potvrditi valjanost projektiranih parametara regulatora.

Nakon što je dobivena simulacijska datoteka, potrebno ju je spremiti. Datoteku je potrebno spremiti na lokaciju: `D:\nastava\om\grupa_x\prezime1_prezime2\vj4_pokus2.mdl`

4.2.1. Izrada simulacijskog modela unutar Simulink okruženja

Simulacijski model kruga regulacije pozicije rotacijskog elektromehaničkog sustava SRV02 treba realizirati u Simulink okruženju, sl.4.



Sl.4. Simulacijski model sustava regulacije pozicije rotacijskog elektromehaničkog modula SRV02

Na mjestu standardnog derivacijskog člana u povratnoj vezi PV regulatora, nalazi se derivacijski član s filtrom kojem je zadatak eliminiranje visokofrekventnih smetnji koje dolaze sa strane pogona. Takve visokofrekventne smetnje kod dužih djelovanja mogu štetno utjecati na namot motora.

Većina korištenih blokova je poznata iz prethodnih vježbi. Novi blokovi su:

- *Transfer Fcn*-blok kojim se formira prijenosna funkcija u s-domeni. Unutar izbornika ovog bloka potrebno je definirati brojnik i nazivnik prijenosne funkcije, sl. 4.. Blokom se simulira derivator s filterom. Nalazi se u Simulink biblioteci *Simulink->Continuous*.
- *SRV02 simulacijski model*-je makro blok koji sadrži simulacijski model elektromehaničkog sustava SRV02, [sl.2](#). Taj makro blok nije dio Simulink biblioteke elemenata već je priređen za korištenje studentima u posebnoj Simulink datoteci (*C:\MATLAB6p5\work\SRV02t.mdl*). Studenti trebaju otvoriti ovu datoteku te kopirati ovaj blok u svoju radnu datoteku. . Nakon toga potrebno je dva puta kliknuti na blok i unijeti parametre (nalaze se u [Dodatak1-popis korištenih oznaka](#)) prema sl. 5.

Sl. 5. Parametri elektromehaničkog sustava SRV02

Parametri podešenja simulacije identični su kao i u vježbama [2.](#) i [3.](#)

4.2.2. Zadaci za izvještaj

Izvještaj o obavljenoj vježbi mora sadržavati:

- Sljedeće dijagrame s pripadajućim komentarima :
 - Usporedba referentnog i reguliranog signala pozicije kod skokovite pobude.
 - Usporedba referentnog i reguliranog signala pozicije kod skokovite pobude u slučaju kada je pojačanje K_p 10 puta veće od proračunate vrijednosti.
 - Usporedba referentnog i reguliranog signala pozicije kod skokovite pobude u slučaju kada je pojačanje K_v 10 puta veće od proračunate vrijednosti.
 - Usporedba signala referentnog i reguliranog signala pozicije kod skokovite pobude u slučaju pozitivne povratne veze.
 - Usporedba signala referentnog i reguliranog pozicije kod skokovite pobude u slučaju prekida povratne veze.
- Konačna zapažanja i zaključke te odgovore na sljedeća pitanja :
 - Da li se uz odabrane parametre K_p i K_v prema (4.13) i (4.14) dobivaju zadane vrijednosti za σ_m i t_p ?
 - Kako iznos referentne pozicije (npr. 50% od nominalne) utječe na iznos σ_m i t_p ? Pokažite to na jednom odzivu.
 - Čemu služi nelinearni element zasićenja u Simulink modelu na sl. 2.?
 - Koja ste sve pojednostavljenja (zanemarenja) načinili u matematičkom modelu prikazanom na sl.2?
 - Da li ste primijetili još neki razlog (osim spomenutog) zbog kojeg se u povratnoj vezi koristi filter?

Dodatak 1. – Popis korištenih oznaka

SIMBOL	OPIS	MATLAB VARIJABLE	NOMINALNA VRIJEDNOST (SI JEDINICE)
u_a	Ulazni napon armaturnog kruga		
i_a	Struja armature		
R_a	Otpor armature	Ra	2.6
L_a	Induktivitet armature		
E	Napon elektromotorne sile motora		
ε_m	Pozicija osovine motora		
ω_m	Kutna brzina osovine motora		
ε_t	Pozicija osovine za terećenje		
ω_t	Kutna brzina osovine za terećenje		
ε_d	Referentna pozicija		
m_m	Moment motora		
m_t	Moment kod opterećenja		
k_e	Konstanta protuelektromotorne sile	Ke	0.0076776
k_m	Konstanta momenta motora	Km	0.007683
J_m	Moment inercije motora	Jmotor	$3.87 \cdot 10^{-7}$
J_{eq}	Ekvivalentni moment tromosti kod opterećenja	Jeq	$2 \cdot 10^{-3}$
B_{eq}	Ekvivalentni koeficijent viskoznog trenja	Beq	$4 \cdot 10^{-3}$
K_g	SRV02 omjer zupčanika sustava (motor-teret)	Kg	70 (14*5)
η_g	Korisnost zupčastog prijenosa	Eff_G	0.9
η_m	Korisnost motora	Eff_M	0.69
ω_n	Prirodna frekvencija neprigušenih oscilacija	Wn	
ζ	Koeficijent prigušenja	zeta	
K_p	Proporcionalno pojačanje	Kp	
K_v	Pojačanje brzine	Kv	
t_p	Vrijeme prvog maksimuma		
σ_m	Maksimalno nadvišenje u prijelaznoj funkciji		