

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

TEHNIKE UPRAVLJANJA U MEHATRONICI

## **2. laboratorijska vježba**

Priprema i upute za rad na vježbi

Zagreb, listopad 2023.

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. Cilj vježbe . . . . .	1
<b>2. Opis sustava</b>	<b>2</b>
2.1. Matematički model rotacijskog modula . . . . .	2
<b>3. Simulacijski dio vježbe</b>	<b>3</b>
3.1. Karakteristike otvorenog kruga . . . . .	3
3.2. Određivanje parametara regulatora . . . . .	3
3.3. Projektiranje kompenzacijskog člana . . . . .	4
3.4. Korištenje Matlab funkcija u postupku sinteze regulatora brzine vrtnje . . . .	4
3.5. Simulacija kruga regulacije brzine vrtnje rotacijskog modula . . . . .	5
3.6. Priprema za eksperimentalni dio vježbe . . . . .	5
<b>4. Eksperimentalni dio</b>	<b>6</b>
4.1. Rad na vježbi i pitanja . . . . .	7

# 1. Uvod

Metode sinteze regulatora u frekvencijskom području bazirane su na odnosu između pokazatelja vladanja sustava u vremenskom i frekvencijskom području. Polazište pri sintezi je frekvencijska karakteristika otvorenog kruga upravljanja. Dodavanjem regulatora u sustav upravljanja želi se postići frekvencijska karakteristika otvorenog kruga s određenim karakterističnim veličinama. Pri tome se mogu koristiti standardni tipovi regulatora (PID regulator i njegove inačice) ili nestandardni tipovi regulatora (kompenzacijski ili korekcijski članovi). Najčešći korekcijski članovi su: kompenzator s faznim prethodjenjem, kompenzator s faznim kašnjenjem i kombinacija kompenzatora s faznim prethodjenjem i faznim kašnjenjem.

## 1.1. Cilj vježbe

Cilj laboratorijske vježbe je upoznavanje s frekvencijskim metodama sinteze regulatora korištenjem Bodeovih dijagrama. Kroz sintezu regulatora brzine vrtnje, upoznati se s utjecajem pojedinih korekcijskih članova (proporcionalni, integralni i kompenzacijski član) na amplitudnu i faznu karakteristiku Bodeovog dijagrama otvorenog regulacijskog kruga.

Vježba se sastoji od simulacijskog dijela koji se radi samostalno te eksperimentalnog dijela koji služi za usporedbu simuliranog i stvarnog sustava. Prije dolaska na eksperimentalni dio, potrebno je proći sve zadatke iz simulacijskog dijela te imati spremne rezultate.

## 2. Opis sustava

### 2.1. Matematički model rotacijskog modula

Projektiranje regulatora izvest će se na primjeru upravljanja brzinom vrtnje rotacijskog modula. Za potrebe ove vježbe, modul je dovoljno opisati prijenosnom funkcijom prvog reda:

$$\frac{\omega(s)}{U_a(s)} \approx \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Parametri sustava dani su u Tablici 2.1 za rotacijske module Quanser i ME13.

**Tablica 2.1**

	Quanser	ME13
$K$	1.467	1.633
$\tau$	0.155	0.166
nazivni napon	$\pm 6$ V	$\pm 12$ V

Za potrebe simulacije, matematički model elektromehaničkog sustava potrebno je prikazati unutar Simulink grafičkog okruženja pomoću odgovarajuće prijenosne funkcije i bloka zasićenja kojim se ograničava upravljački signal ispod nazivnog napona motora.

### 3. Simulacijski dio vježbe

Zadatak je projektirati regulator brzine vrtnje elektromehaničkog sustava koristeći kompenzacijski član s faznim prethodjenjem/kašnjenjem tako da se ostvare sljedeći zahtjevi:

1. Sustav treba imati statičku pogrešku jednaku nuli.
2. Presječna frekvencija sustava treba iznositi 5 rad/s (približno 0.8 Hz).
3. Otvoreni sustav treba imati fazno osiguranje približno 85 stupnjeva.
4. Sustav ne smije imati nadvišenje.

#### 3.1. Karakteristike otvorenog kruga

U svrhu postizanja statičke pogreške brzine vrtnje jednake nuli na skokovitu ulaznu funkciju, sustav mora imati astatizam prvog reda, odnosno jedan pol smješten u ishodištu (integrator). Budući da prijenosna funkcija (2.1) nema pol u ishodištu, potrebno je uvesti integracijski član u regulacijski krug. Prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog kruga s dodanim integratorom je  $G(s)/s$ .

#### 3.2. Određivanje parametara regulatora

Nakon dodavanja integracijskog člana i postizanja prvog uvjeta da je statička pogreška jednaka nuli, slijedi namještanje tražene presječne frekvencije otvorenog regulacijskog kruga i faznog osiguranja pri toj presječnoj frekvenciji. Proces projektiranja može se podijeliti na sljedeće korake:

1. Crtanje Bodeovih dijagrama otvorenog kruga s integratorom  $G(s)/s$ .
2. Podešavanje pojačanja  $K_p$  tako da presječna frekvencija staze  $K_p \cdot G(s)/s$  iznosi 5 rad/s.
3. Projektiranje kompenzacijskog člana s faznim prethodjenjem/kašnjenjem  $C(s)$  tako da fazno osiguranje staze  $K_p \cdot C(s) \cdot G(s)/s$  iznosi 85 stupnjeva.

Za sva tri koraka sinteze regulatora potrebno je poznavati način crtanja Bodeovih dijagrama u Matlabu. Kod koraka 2. iterativnim postupkom se traži iznos pojačanja  $K_p$ , sve dok presječna frekvencija staze  $K_p \cdot G(s)/s$  ne bude 5 rad/s. Kod koraka 3. potrebno je napraviti sintezu kompenzacijskog člana s faznim prethodjenjem/kašnjenjem kojom se postiže traženo fazno osiguranje od 85°.

### 3.3. Projektiranje kompenzacijskog člana

Kompenzacijski član s faznim prethodjenjem/kašnjenjem služi za korekciju Bodeove fazne karakteristike promatranog sustava. Potrebno je projektirati kompenzacijski član koji će unijeti traženi fazni pomak u faznoj karakteristici, pri čemu presječna frekvencija mora ostati nepromijenjena. To znači da pojačanje kompenzacijskog člana na presječnoj frekvenciji mora biti 0 dB, odnosno 1. Kompenzacijski član općenito ima prijenosnu funkciju:

$$C(s) = \alpha \frac{s + \frac{\omega_c}{\alpha}}{s + \alpha\omega_c}, \quad (3.1)$$

gdje je  $\omega_c$  presječna frekvencija, a  $\alpha$  parametar koji se računa kao:

$$\alpha = \tan \phi + \sqrt{(\tan \phi)^2 + 1}, \quad (3.2)$$

te  $\phi$  predstavlja kut za koji je potrebno korigirati faznu karakteristiku sustava.

### 3.4. Korištenje Matlab funkcija u postupku sinteze regulatora brzine vrtnje

Za crtanje Bodeovih dijagrama s automatskim prikazom faznog i amplitudnog osiguranja koristi se Matlab funkcija `margin`.

Da bi se nacrtali Bodeovi dijagrami, potrebno je prvo definirati brojnik i nazivnik prijenosne funkcije čije Bodeove dijagrame želimo nacrtati. Npr. ako prijenosna funkcija glasi  $G(s) = \frac{2s^2+s-1}{s^2-3s+5}$ , brojnik i nazivnik se mogu definirati kao dva vektora, `num` i `den`, kako slijedi:

```
num = [2 1 -1];
```

```
den = [1 -3 5];
```

Prijenosnu funkciju je moguće prikazati objektom tipa `tf` kako slijedi:

```
G = tf(num,den);
```

Nad objektima tipa `tf` moguće je jednostavno raditi operacije množenja, oduzimanja, zbrajanja i dijeljenja te je moguće na jednostavan način nacrtati odgovarajući Bodeov dijagram za dobiveni rezultat.

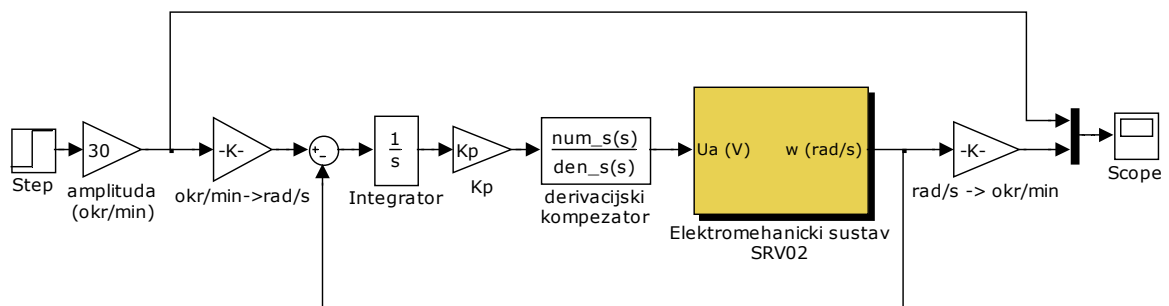
Za dobivanje Bodeovog dijagrama s odgovarajućim amplitudnim i faznim osiguranjem, moguće je koristiti funkciju `margin` kako slijedi:

```
margin(G);
```

### 3.5. Simulacija kruga regulacije brzine vrtnje rotacijskog modula

Nakon određivanja parametara regulatora potrebno je simulirati krug regulacije brzine vrtnje kako bi se potvrdilo da taj krug ispunjava postavljene kriterije. Zadatak je:

- Unutar Simulink okruženja izraditi simulacijski model sustava regulacije brzine vrtnje rotacijskog elektromehaničkog modula, Slika 3.1.
- Snimiti karakteristične odzive na skokovitu pobudu te potvrditi valjanost projektiranog regulatora.



Slika 3.1: Simulacijski model sustava regulacije brzine vrtnje rotacijskog elektromehaničkog modula

### 3.6. Priprema za eksperimentalni dio vježbe

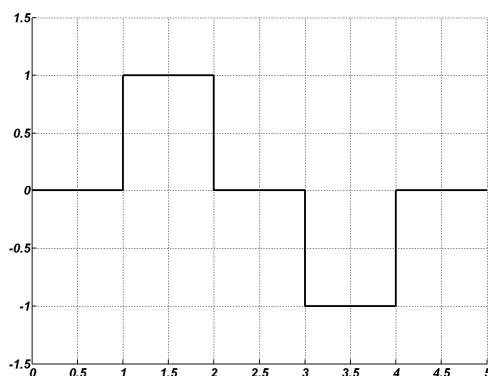
Prije dolaska na eksperimentalni dio vježbe, potrebno je odgovoriti na sljedeća pitanja:

- Za koji rotacijski modul ste projektirali regulator (Quanser ili ME13)?  
Odgovor: \_\_\_\_\_
- Koliko iznosi traženo pojačanje regulatora,  $K_p$ ?  
Odgovor: \_\_\_\_\_
- Koliko iznosi parametar kompenzacijskog člana  $\alpha$ ?  
Odgovor: \_\_\_\_\_
- Kako se mijenja odziv sustava kad regulator nema integracijskog djelovanja?  
Odgovor: \_\_\_\_\_
- Kako se mijenja odziv sustava kad je pojačanje  $K_p$  10 puta veće od proračunatog?  
Odgovor: \_\_\_\_\_

## 4. Eksperimentalni dio

Cilj ovog dijela laboratorijske vježbe je implementacija i provjera sinteze regulatora iz prethodnog dijela. Pri tome je potrebno usporediti stvarne i simulirane regulacijske karakteristike. To će se postići generiranjem zajedničke reference i korištenjem istog (projektiranog) regulatora za stvarni i simulirani sustav. Prije puštanja u pogon, potrebno je ostvariti mjerenje brzine vrtnje i slanje analognog signala koristeći Simulink Desktop Real Time programsko okruženje i dostupne mjerne članove na rotacijskom modulu.

Provjera regulacijskih karakteristika vrši se snimanjem odziva brzine vrtnje na skokovitu pobudu (step) i test ulaznu funkciju oblika prikazanog na Sl. 4.1, koja se može ostvariti npr. zbrajanjem izlaza četiri *Step* Simulink bloka.



Slika 4.1: Oblik ulazne test funkcije.

**Napomena:** Prije samog puštanja u pogon, preporuka je provjeriti signal povratne veze na stvarnom sustavu. Za to možete slijediti sljedeći postupak:

1. Spojiti konstantan napon (npr. 3 V) na ulaz u simulacijski model i na analogni izlaz.
2. Mjeriti brzinu vrtnje iz simulacijskog bloka te usporediti sa stvarnom brzinom vrtnje koja se dobiva s enkodera.
3. Tek kada obje brzine vrtnje imaju približno jednak iznos te isti predznak, spojiti regulator na oba ulaza i ispitati vladanje regulatora brzine vrtnje.



## 4.1. Rad na vježbi i pitanja

– Usporedite sljedeće odzive i zapišite komentare:

- Odziv simulirane i stvarne brzine vrtnje na ulaznu skokovitu pobudu (step).

Komentar: \_\_\_\_\_

- Odziv simulirane i stvarne brzine vrtnje na ulaznu test pobudu (Sl. 4.1).

Komentar: \_\_\_\_\_

– Odgovorite na sljedeća pitanja:

- Koji parametar ograničava frekvenciju test ulazne funkcije na Sl. 4.1? Do koje granice se može povećavati ta frekvencija, a da ne dođe do narušavanja regulacijskih karakteristika? Pokažite i obrazložite jednostavnim testom na simulacijskom modelu.

Odgovor: \_\_\_\_\_

- Utječe li amplituda ulazne test funkcije na regulacijske karakteristike sustava? Obrazložite.

Odgovor: \_\_\_\_\_