

## UPRAVLJANJE ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Ponovljeni završni ispit - 03.02.2010.

1. (6 bodova) Istosmjerni motor s nezavisnom i konstantnom uzбудom ima sljedeće nazivne podatke:

nazivna snaga	$P_n = 33 \text{ kW}$
nazivni napon armature	$U_{an} = 440 \text{ V}$
nazivna struja armature	$I_{an} = 83 \text{ A}$
nazivna brzina vrtnje	$n_n = 1040 \text{ min}^{-1}$
otpor armature	$R_a = 0,24 \Omega$

Motor radi na pogonu za dizanje i spuštanje tereta preko reduktora. Motor se napaja iz 4-kvadrantnog čopera čiji je ulaz spojen na 440 V, a modulacija je bipolarna. Moment trenja reduktora je 15 Nm. Moment tereta je potencijalnog karaktera i iznosi 150 Nm. Pretpostavite da je moment trenja i ventilacije motora konstantan.

- a) Odredite brzinu spuštanja tereta, ako motor radi u režimu generatorskog kočenja. Ucertajte radnu točku s momentnim karakteristikama motora i tereta.
- b) U kojem režimu će raditi motor ako se pri dizanju tereta u armaturni krug dodatno uključi otpor od  $3 \Omega$ ? Kolika je u tom slučaju brzina motora? Kolika je korisnost motora? Ucertajte radnu točku s momentnim karakteristikama motora i tereta.

Rješenje:

a)  $\omega = 115,88 \text{ rad/s} \Rightarrow n = 1107 \text{ o/min}$

- b) motorski režim rada

$$\omega = 74,32 \text{ rad/s} \Rightarrow n = 710 \text{ o/min}$$

$$\eta = 0,591 \Rightarrow \eta = 59,1\%$$

2. (7 bodova) Asinkroni se stroj vrti konstantnom brzinom vrtnje  $n = 1460 \text{ min}^{-1}$ . U trenutku  $t$  estimiran je položaj vektora toka rotora koji iznosi  $\rho = \pi / 3$ , te rezultirajući vektor struje statora koji iznosi  $\vec{i}_s = 25 \angle 75^\circ \text{ A}$ .

- a) Odredite vrijednosti faznih struja stroja,  $\alpha$  i  $\beta$ , te  $d$  i  $q$  komponenta vektora struje statora.
- b) Nacrtajte model za estimaciju položaja vektora toka rotora.

Rješenje:

a)  $i_a = i_{s\alpha} = 6,47 \text{ A}$

$$i_{s\beta} = 24,14 \text{ A}$$

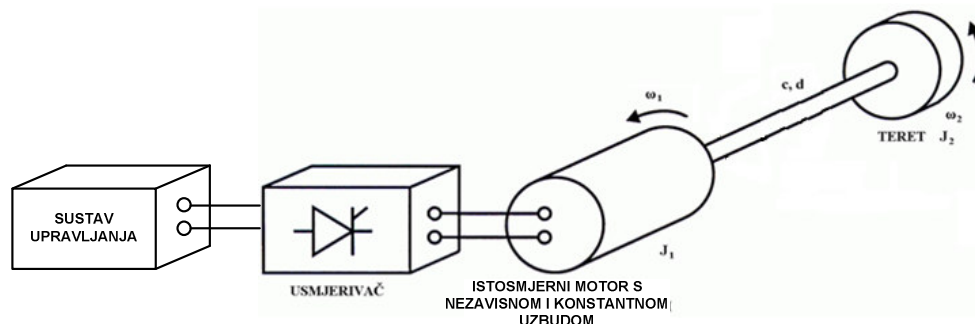
$$i_b = 17,64 \text{ A}$$

$$i_c = -24,11 \text{ A}$$

$$i_{sd} = 24,14 \text{ A}$$

$$i_{sq} = 6,47 \text{ A}$$

3. (12 bodova) Za elektromotorni pogon s elastičnim prijenosom prikazanim na slici 1 potrebno je projektirati kaskadni sustav upravljanja brzinom vrtnje s podređenim regulacijskim krugom po armaturnoj struji motora. Regulator brzine vrtnje izveden je kao digitalni  $PI_m$  regulator stanja reduciranog reda. Elastični prijenos modelirati kao element s krutosti (c) i prigušenjem (d). Parametri mehaničkog podsustava elektromotornog pogona dani su u tablici 1.



Slika 1 Skica elektromotornog pogona sa elastičnim prijenosom

Tablica 1. Parametri elektromotornog pogona sa elastičnim prijenosom

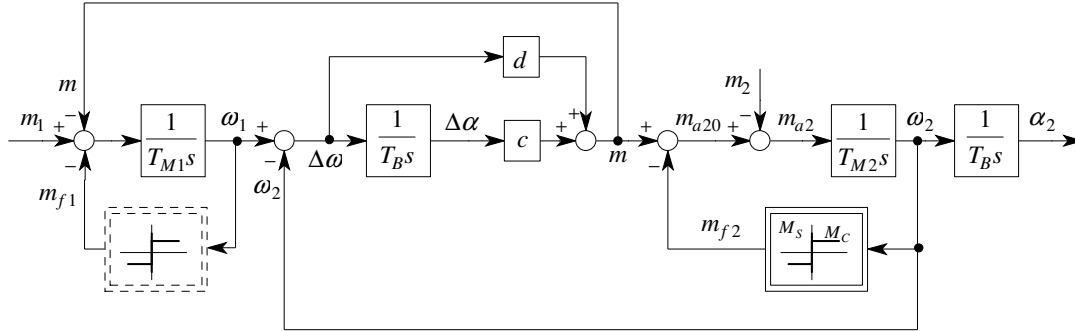
$T_{M1} = 1 \text{ s}$	mehanička vremenska konstanta motora
$T_{M2} = 1,5 \text{ s}$	mehanička vremenska konstanta tereta
$c = 100 \text{ Nm/rad}$	konstanta krutosti
$d = 0,25 \text{ Nms/rad}$	konstanta prigušenja
$T_B = 1 \text{ s}$	normirana vremenska konstanta
$T_{ei} = 0,01 \text{ s}$	nadomjesna vremenska konstanta podređenog regulacijskog kruga struje
$T = 0,001 \text{ s}$	vrijeme uzorkovanja

Potrebno je:

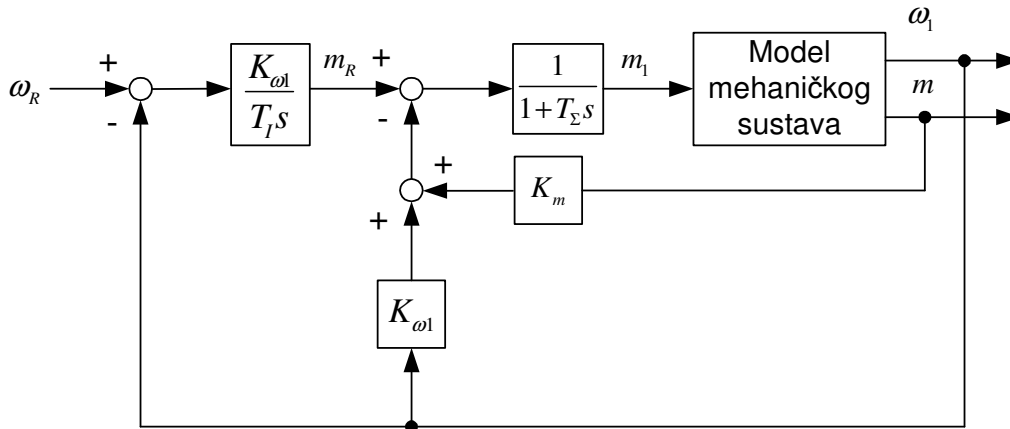
- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu mehaničkog podsustava elektromotornog pogona.
- Odredite prijenosnu funkciju  $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$  gdje je  $\Omega_2(s)$  brzina vrtnje na strani tereta, a  $M_1(s)$  razvijeni moment motora. Komentirajte dobiveni red prijenosne funkcije  $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$ .
- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu kontinuiranog regulacijskog kruga upravljanja brzinom vrtnje elektromotornog pogona s regulatorom brzine vrtnje izvedenim kao regulator stanja reduciranog reda s podređenim regulatorom po razvijenom momentu.
- Odrediti parametre  $PI_m$  regulatora brzine vrtnje pomoću optimuma dvostrukog odnosa uz zadanu nadomjesnu vremensku konstantu zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje  $T_e = 0,36 \text{ s}$ .
- Naveći osnovne karakteristike  $PI_m$  regulatora podešenog prema postupku pod c) te u kojem slučaju se preporuča korištenje  $PI_m$  regulatora?

Rješenje:

a)



b)



c)

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{\frac{d}{c} T_B s + 1}{(T_{M1} + T_{M2})s \left[ \frac{s^2}{\frac{c}{T_B} \left( \frac{1}{T_{M1}} + \frac{1}{T_{M2}} \right)} + \frac{d}{c} T_B s + 1 \right]}$$

Mehanički podsustav sadrži tri spremnika energije: zamašnu masu motora, elastična duga osovina te zamašnu masu tereta. Slijedi da je prijenosna funkcija trećeg reda.

d)

$$T_I = 0.36[s]$$

$$K_{\omega l} = 20,23$$

$$K_m = 0,19$$

e)

- Prednost uvođenja dodatne povratne veze po prijenosnom momentu  $m$  dolazi do izražaja kod pogona s malim odnosom inercija  $r_M < 1$ .
- Tako se u slučaju "meke veze" potpuno prigušuju oscilacije odziva karakteristične za regulacijski krug s PI regulatorom.
- Kod "srednje-krute veze" dolazi do značajnog prigušenja oscilacija odziva u odnosu na sustav s PI regulatorom.

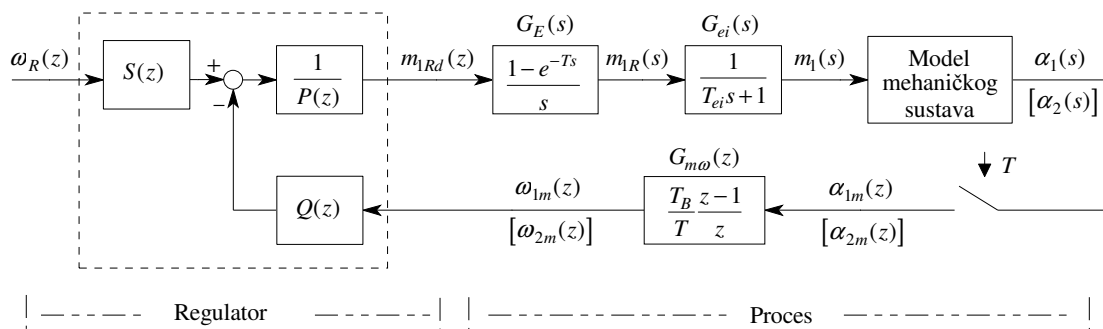
- No, pritom se javlja negativni učinak velikog prebačaja brzine vrtnje tereta  $\omega_2$  u odzivu na udarno opterećenje.
- Bolje prigušenje visokofrekvencijskih oscilacija odziva na udarno opterećenje pogona s "krutom vezom".
- Uz  $\zeta \approx 0$  usporava se odziv regulacijskog kruga s  $PI_m$  regulatorom – izbjegnute su oscilacije karakteristične za PI regulator.

**4. (5 bodova) Potrebno je:**

- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu sustava upravljanja brzinom vrtnje elektromotornog pogona s elastičnim prijenosom zasnovanim na polinomskom regulatoru.
- Objasniti postupak parametriranja polinomskog regulatora brzine vrtnje.

Rješenje:

a)



b)

Polinomski regulator je regulator stanja punog reda s implicitno uključenim estimatorom stanja (observerom). Koristi se samo jedan mjerni signal: brzina vrtnje motora ili tereta. Mjerni signal brzine vrtnje, rekonstruira se diferenciranjem mjernog signala položaja. Opći linearni polinomski regulator dan je u  $z$  - području jednačom:

$$m_{1Rd}(z) = \frac{S(z)}{P(z)} \omega_R(z) - \frac{Q(z)}{P(z)} \omega_m(z)$$

Stacionarna točnost regulacijskog kruga - uključanje integralnog djelovanja u regulator. Jedan od korijena polinoma  $P(z)$  postavlja se na iznos 1:

$$P(z) = (z-1)P'(z)$$

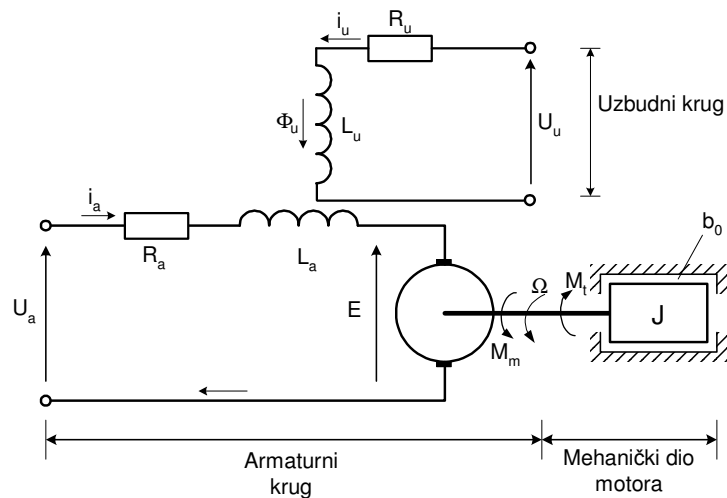
Regulacijski krug treba imati:

- brzo i dobro prigušeno vladanje s obzirom na referencu  $\omega_R$  i moment tereta  $m_2$ ,
- malu osjetljivost na mjerni šum i pogreške modeliranja procesa.

Definira se modelska funkcija koja sadrži karakterističan polinom 5. reda definiran korištenjem optimuma dvostrukog odnosa. Vremensku konstantu  $T_e$  treba postaviti na što niži iznos da bi se dobio što brži odziv regulacijskog kruga i što efikasnija kompenzacija utjecaja momenta tereta. Slijedi Diophontova jednačba čijim rješenjem se dobivaju parametri polinomskog regulatora.

**5. (12 bodova) Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzбудom prikazana je na slici 2. Istosmjerni se motor napaja iz trofaznog punoupravljivog**

tiristorskog usmjerivača. Elektromotorni pogon s tako napajanim motorom upravlja se tropetljasnim kaskadnim sustavom upravljanja po zakretu (položaju), brzini vrtnje i razvijenom momentu motora (PI regulator momenta podešen pomoću tehničkog optimuma). Nadalje, u sustavu postoji viskozno trenje koje se može opisati relacijom:  $m_{tr}(t) = b_0 \cdot \omega(t)$ . Parametri elektromotornog pogona dani su u tablici 2.



**Slika 2.** Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzбудom.

**Tablica 2.** Parametri elektromotornog pogona s istosmjernim motorom s nezavisnom uzбудom

$P_n = 7,5 \text{ kW}$	nazivna vrijednost snage motora
$U_{an} = 420 \text{ V}$	nazivna vrijednost napona armature
$I_{an} = 20 \text{ A}$	nazivna vrijednost struje armature
$U_{un} = 242 \text{ V}$	nazivna vrijednost napona uzbuđe
$I_{un} = 2,3 \text{ A}$	nazivna vrijednost struje uzbuđe
$n_n = 1480 \text{ o/min} \Rightarrow \Omega_n = 154,98 \text{ rad/s}$	nazivna vrijednost brzine vrtnje
$R_a = 0,2 \text{ } \Omega$	otpor armature motora
$L_a = 4 \text{ mH}$	induktivitet armature motora
$K = c_e = c_m = 2,68 \text{ Vs/rad}$	konstrukcijska konstanta motora
$J = 0,151 \text{ kgm}^2$	moment inercije
$K_t = 44$	pojačanje tiristorskog usmjerivača
$T_{mi} = 1,66 \text{ ms}$	nadomjesna vremenska konstanta tiristorskog usmjerivača
$b_0 = 1,5 \text{ Nms}$	koeficijent viskoznog trenja
$K_i = 0,5 \text{ V/A}$	pojačanje mjernog člana struje armature
$T_{fi} = 2 \text{ ms}$	vremenska konstanta mjernog člana struje armature
$K_b = 0,065 \text{ Vs}$	pojačanje mjernog člana brzine vrtnje
$T_B = 1 \text{ s}$	normirana vremenska konstanta
$T_{fb} = 15 \text{ [ms]}$	vremenska konstanta mjernog člana brzine vrtnje

Potrebno je:

- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu kaskadnog sustava upravljanja istosmjernog elektromotornog pogona s krutim prijenosom. Podređenu petlju po momentu

nadomjestiti PT<sub>1</sub> članom. Pri tome je regulator položaja P-tipa, a regulator brzine vrtnje PI-tipa.

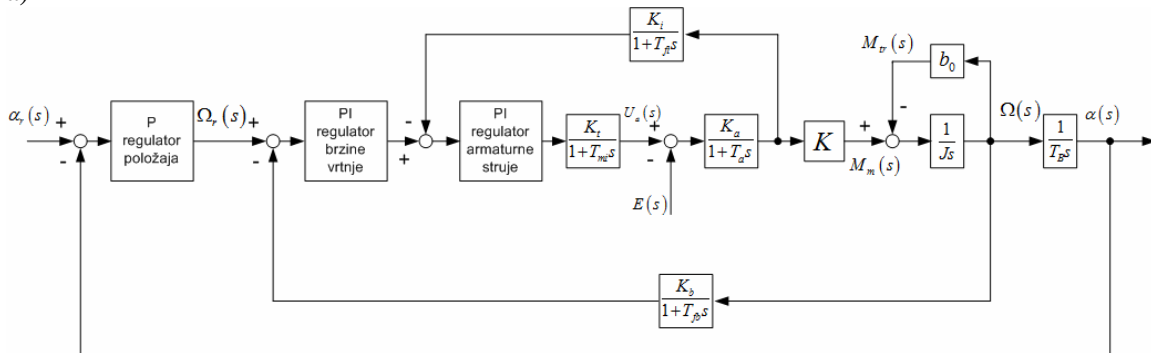
- b) Odrediti prijenosnu funkciju zatvorenog regulacijskog kruga položaja  $\frac{\alpha(s)}{\alpha_r(s)}$ , gdje je

$\alpha(s)$  zakret motora, a  $\alpha_r(s)$  referentna veličina zakreta motora. Male (nedominantne) vremenske konstante u regulacijskom krugu brzine vrtnje zamijeniti jednom nadomjesnom vremenskom konstantom. Eventualno dobivene nule kompenzirati prefiltrom.

- c) Odrediti parametre regulatora položaja i regulatora brzine vrtnje korištenjem modulnog optimuma.

Rješenje:

a)



b)

$$T_{\Sigma}^* = 22,32[ms]$$

$$G_{cl}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0},$$

$$b_0 = K_{R_2} K_{R_1} K, \quad b_1 = K_{R_2} K_{R_1} K T_{I_2}, \quad a_0 = K_{R_2} K_{R_1} K, \quad a_1 = K_{R_2} K (K_{R_1} T_{I_2} + T_B K_b)$$

$$a_2 = T_B T_{I_2} (K_b K_{R_2} K + K_i b_0), \quad a_3 = T_B T_{I_2} (b_0 T_\Sigma^* K_i + K_i J), \quad a_4 = J K_i T_B T_\Sigma^* T_I.$$

c)

Postavljaju se uvjeti za prošireni modulni optimum.

$$a_1^2 - 2a_0a_2 = b_1^2$$

$$a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 = 0$$

$$a_3^2 - 2a_2a_4 = 0$$

$$K_{R2} = 10,2$$

$$T_{I2} = 0.1s, \quad K_{R1} = 0,77$$

$$T_{I2} = 0,011s, \quad K_{R1} = 7$$

Prva skupina vrijednosti parametara regulatora ( $T_{I2} = 0.1s$ ,  $K_{R1} = 0,77$ ) predstavlja fizikalno moguće podešenje regulatora po modulnom optimumu. Potrebno je obratiti pažnju na to da uz  $T_{I2} = 0.1s$  dolazi do kompenzacije vremenske konstante koje uzrokuje viskozno trenje.