

UPRAVLJANJE ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Završni ispit - 27.01.2010

1. (7 bodova) Dva istosmjerna nezavisno uzbuđena motora spojena su na zajedničku osovinu. Nazivni podaci motora su:

Motor1:

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

Motor2:

nazivna snaga $P_n = 34 \text{ kW}$
nazivni napon $U_{an} = 440 \text{ V}$
nazivna struja $I_{an} = 87 \text{ A}$
nazivna brzina vrtnje $n_n = 1060 \text{ min}^{-1}$
otpor armature $R_a = 0,3 \Omega$

Motori rade na pogonu za dizanje i spuštanje tereta koje je ostvareno preko reduktora. Moment trenja reduktora je 10 Nm . Moment tereta je potencijalnog karaktera i iznosi 400 Nm .

- a) Odredite moment trenja i ventilacije, te potezni moment pojedinog motora, kada se motori priključe na nazivni napon?
b) Odredite brzine vrtnje motora, ako se uzbuda (tok) motora 2 smanji za 5% u odnosu na nazivnu vrijednost. Je li dozvoljen trajni rad pogona u ovoj radnoj točki?

Rješenja:

Motor 1:

$$\omega_{n1} = 108,9 \text{ rad / s}$$

$$c_{e1} = 3,8572$$

$$M_{n1} = 303,0 \text{ Nm}$$

$$M_{emn1} = 320,1 \text{ Nm}$$

Motor 2:

$$\omega_{n2} = 111 \text{ rad / s}$$

$$c_{e2} = 3,7287$$

$$M_{n2} = 306,3 \text{ Nm}$$

$$M_{emn2} = 324,4 \text{ Nm}$$

a)

$$M_{tr,ven1} = 17,1 \text{ Nm}$$

$$M_{tr,ven2} = 18,1 \text{ Nm}$$

$$M_{k1} = 7071,3 \text{ Nm}$$

$$M_{k2} = 5468,7 \text{ Nm}$$

b)

$$c'_{e2} = 3,5423$$

$$I_1 = 3,27 \text{ A}; I_2 = 122,13 \text{ A}$$

$$n = 1087 \text{ rpm}$$

Nije, jer je struja motora 2 veća od njegove nazivne struje.

2. (6 bodova) Asinkroni se stroj vrti konstantnom brzinom vrtnje $n = 1460 \text{ min}^{-1}$. Nazivna struja stroja iznosi $I_n = 20 \text{ A}$, a stroj je opterećen nazivnim momentom. Struje statora određene su izrazima:

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \sin(\omega t), \\ i_{sb} &= I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \\ i_{sc} &= I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}). \end{aligned}$$

U trenutku $t = 0.007 \text{ s}$ estimirani položaj vektora toka rotora iznosi $\rho = \pi / 6$. Odredite vrijednosti faznih struja statora, α i β , te d i q komponenti vektora struje statora u trenutku $t = 0.007 \text{ s}$.

Rješenja:

$$\omega = 314,16 \text{ rad / s}$$

Za trenutne vrijednosti struja statora se dobije:

$$i_{sa} = 22,88 \text{ A}$$

$$i_{sb} = 2,96 \text{ A}$$

$$i_{sc} = -25,84 \text{ A}$$

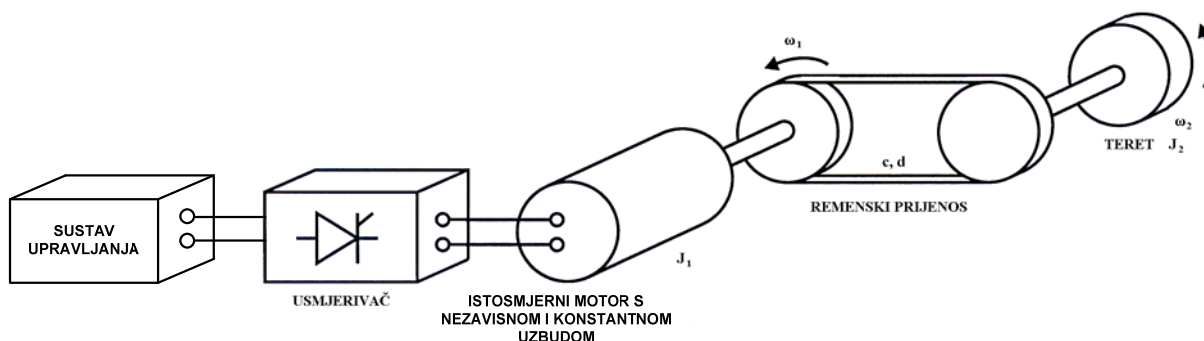
$$i_{s\alpha} = i_{sa} = 22,88 \text{ A}$$

$$i_{s\beta} = 16,63 \text{ A}$$

$$i_{sd} = 28,13 \text{ A}$$

$$i_{sq} = 2,96 \text{ A}$$

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. Remenski 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 s remenskim prijenosom

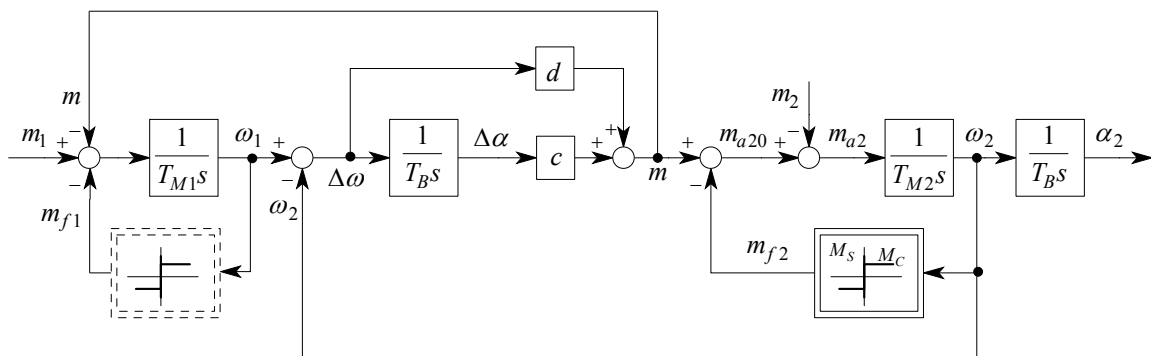
Tablica 1. Parametri elektromotornog pogona s remenskim prijenosom

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

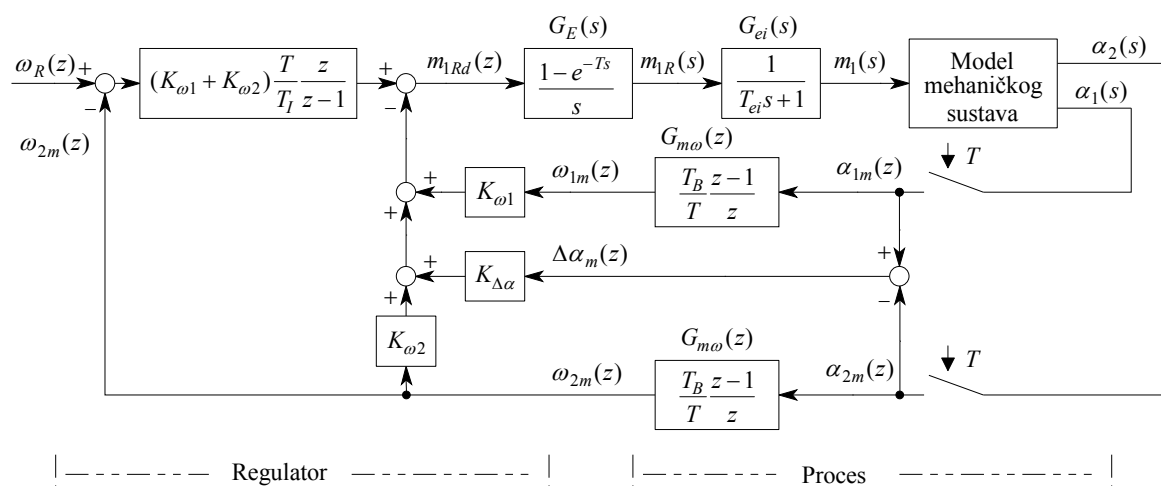
Potrebno je:

- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu mehaničkog podsustava elektromotornog pogona.
- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu sustava upravljanja brzinom vrtnje elektromotornog pogona s regulatorom brzine vrtnje izvedenog kao regulator stanja punog reda.
- Odrediti parametre regulatora i nadomjesnu vremensku konstantu zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje pomoću optimuma dvostrukog odnosa.
- Zašto se koristi „modificirana“ izvedba regulatora brzine vrtnje, a ne „klasična“?

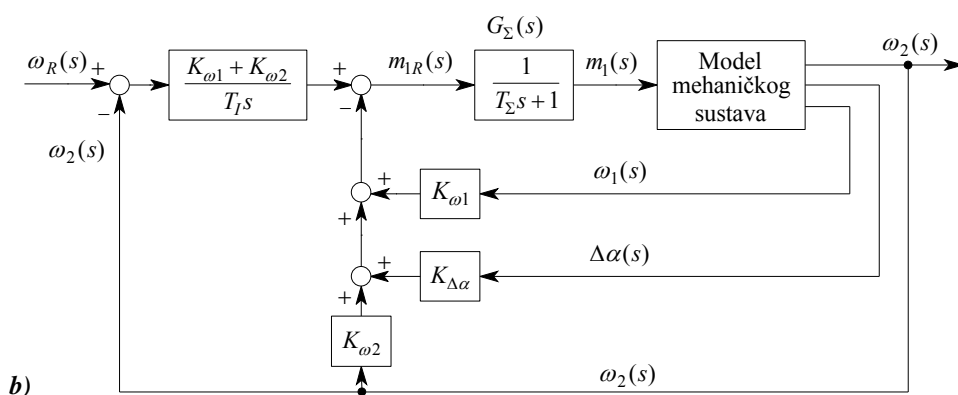
Rješenje:



Sl. Strukturnu blokovska shema mehaničkog podsustava elektromotornog pogona.



a)



b)

Sl. Nadomjesna shema kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s PI regulatorom stanja punog reda.

- tražene karakteristike podešenja regulatora daje optimum dvostrukog odnosa

$$D_i = 0,5$$

- nadomjesna vremenska konstanta zatvorenog kruga

$$T_e = 0.175s$$

- integracijska vremenska konstanta PI regulatora

$$T_I = 0.17s$$

- pojačanje PI regulatora

$$K_{\omega 1} = 44,14$$

$$K_{\omega 2} = 541,24$$

- pojačanje signala zakreta između osovine motora i osovine tereta

$$K_{\Delta\alpha} = 875,11$$

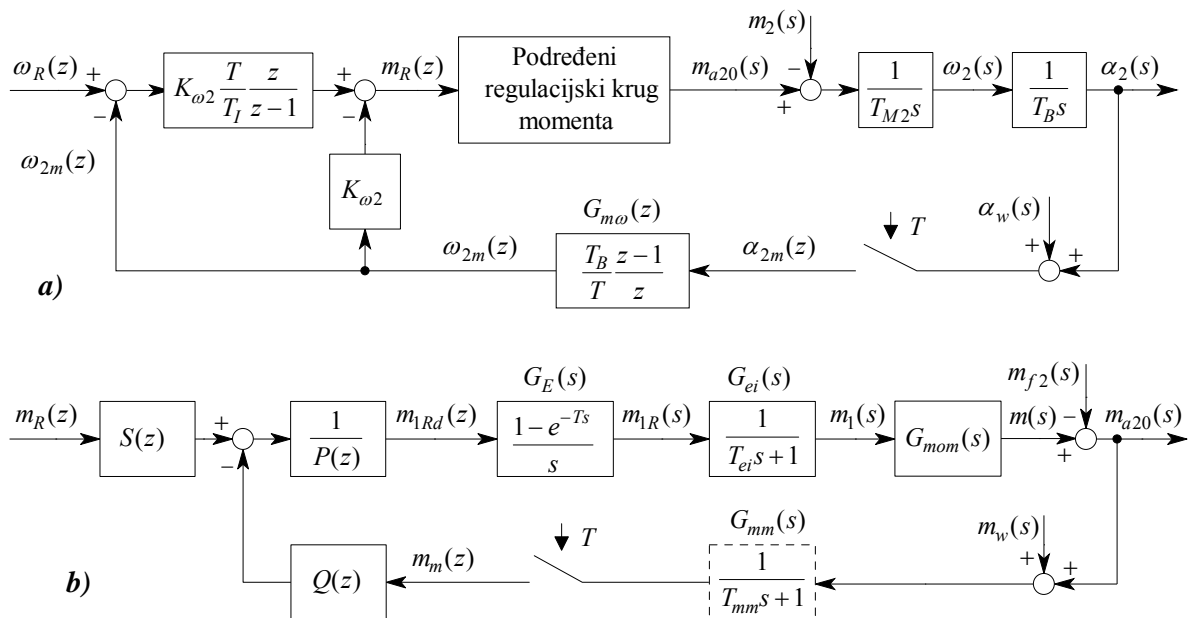
Modificirana verzija PI regulatora koristi se kako bi se izbjeglo pojavljivanje nula u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga koje kvare ponašanje regulacijskog sustava.

4. (5 bodova)

- Objasnite ulogu pretkompenzatora u grani referentne veličine brzine vrtnje elektromotornog pogona.
- Nacrtajte strukturnu blokovsku shemu kaskadnog sustava upravljanja brzinom vrtnje s podređenim regulacijskim krugom po prijenosnom momentu zasnovanom na polinomskom regulatoru. Objasnite postupak parametriranja polinomskog regulatora prijenosnog momenta.

Rješenje:

Pretkompenzator u grani referentne veličine se uvodi radi poboljšanja vladanja sustava s obzirom na referentnu veličinu, odnosno smanjenja pogreške slijeđenja referentne veličine. Pretkompenzator u grani referentne veličine krati nule prijenosne funkcije zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje koje kvare vladanje sustava upravljanja. Pri tome je bitno da se nestabilne ili slabo prigušene nule ne smiju kratiti pretkompenzatorom. Dodatno može pretkompenzator služiti za kompenzaciju utjecaja poremećajne veličine pri čemu se uvodi dodatni signal koji djeluje nakon pretkompenzatora za referentnu veličinu. Uvjet je mogućnost mjerenja/estimacije/rekonstrukcije poremećajne veličine te poznavanje prijenosne funkcije procesa s obzirom na poremećajnu veličinu.



Sl. Strukturna blokovska shema kaskadnog sustava upravljanja brzinom vrtnje s podređenim regulacijskim krugom po prijenosnom momentu zasnovanom na polinomskom regulatoru.

Sinteza regulacijskog sustava provodi se u dva koraka:

1. Sinteza podređenog regulacijskog kruga momenta

Polazi se od zahtjeva za postizanjem brzog i dobro prigušenog vladanja.

2. Zatvoreni regulacijski krug momenta nadomješta se PT₁ članom.

Provodi se standardni postupak sinteze regulacijskog kruga brzine vrtnje.

Podređeni regulacijski krug momenta

- Prijenosna funkcija procesa u podređenom regulacijskom krugu momenta Sl. 15.4.b) je:

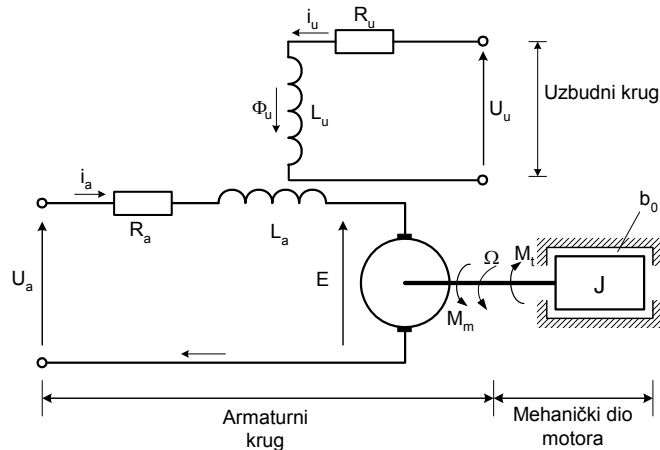
$$G_{pm}(z) = \frac{m_m(z)}{m_{1Rd}(z)} = G_E G_{ei} G_{mom}(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad \text{uz}$$

$$G_{mom}(s) = \frac{m(s)}{m_1(s)} = \frac{T_{M2}}{T_{M\Sigma}} \frac{1 + 2\zeta_2 \Omega_{02}^{-1} s}{\Omega_{02}^{-2} s^2 + 2\zeta_2 \Omega_{02}^{-1} s + 1}$$

- Za prijenosnu funkciju mjernog člana momenta $G_{mm}(s)$, pretpostavlja se da ima znatno višu graničnu frekvenciju od zatvorenog regulacijskog kruga struje $G_{ei}(s)$, tj. $T_{mm} \ll T_{ei}$ ($G_{mom} \approx 1$).
- Regulator minimalnog reda, bez kašnjenja i bez integralnog djelovanja ($i=0$) dobije se uz izbor:
 $\deg P = \deg Q = \deg S = \deg A_o = \deg A_M = 2$
- Nadomjesni kontinuirani karakteristični polinom $A_{Mc}(s)$ modelske prijenosne funkcije $G_M(z)$ određen je kao:
 $A_{Mc}(s) = D_{3m} D_{2m}^2 T_{em}^3 s^3 + D_{2m} T_{em}^2 s^2 + T_{em} s + 1$
- Vrijeme uzorkovanja T treba zadovoljiti uvjete na izbor vremena uzorkovanja

$$T = \frac{1}{\Omega_0} \quad \text{i} \quad T_{em} = 2\sqrt{2}T$$

5. (12 bodova) Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom prikazana je na slici 2. Istosmjerni se motor napaja iz trofaznog punoupunljivog tiristorskog usmjerivača. Nadalje, u sustavu postoji viskozno trenje koje se može opisati relacijom: $m_{tr}(t) = b_0 \cdot \omega(t)$. Sustav upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog motora sastoji se od nadređenog kruga regulacije brzine vrtnje te podređenog kruga regulacije armaturne struje (PI regulator podešen pomoću tehničkog optimuma). Parametri istosmjernog motora, uključujući parametre tiristorskog usmjerivača i mjernih članova dani su u tablici 2.



Slika 2. Nadomjesna shema istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom.

Tablica 2. Parametri elektromotornog pogona s istosmjernim motorom s nezavisnom uzbudom

$P_n = 13,5 \text{ kW}$	nazivna vrijednost snage motora
$U_{an} = 420 \text{ V}$	nazivna vrijednost napona armature

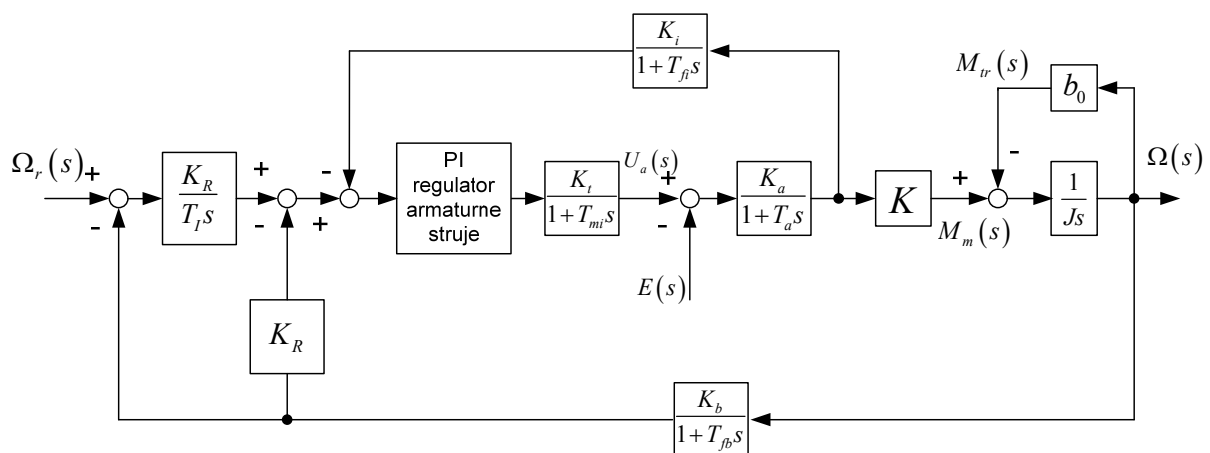
$I_{an} = 40,6 \text{ A}$	nazivna vrijednost struje armature
$U_{un} = 242 \text{ V}$	nazivna vrijednost napona uzbude
$I_{un} = 2,3 \text{ A}$	nazivna vrijednost struje uzbude
$n_n = 1480 \text{ o/min} \Rightarrow \Omega_n = 155 \text{ rad/s}$	nazivna vrijednost brzine vrtnje
$R_a = 1,83 \text{ } \Omega$	otpor armature motora
$L_a = 10,71 \text{ mH}$	induktivitet armature motora
$K = K_e = K_m = 2,147 \text{ Vs/rad}$	konstrukcijska konstanta motora
$J = 0,151 \text{ kgm}^2$	moment inercije
$K_t = 0,25$	pojaćanje tiristorskog usmjerivaća
$T_{mi} = 1,66 \text{ ms}$	vremenska konstanta tiristorskog usmjerivaća
$b_0 = 1,5 \text{ Nms}$	koeficijent viskoznog trenja
$K_i = 0,5 \text{ V/A}$	pojaćanje mjernog člana struje armature
$T_{fi} = 2 \text{ ms}$	vremenska konstanta mjernog člana struje armature
$K_b = 0,065 \text{ Vs}$	pojaćanje mjernog člana brzine vrtnje
$T_{fb} = 15 \text{ [ms]}$	vremenska konstanta mjernog člana brzine vrtnje

Potrebno je:

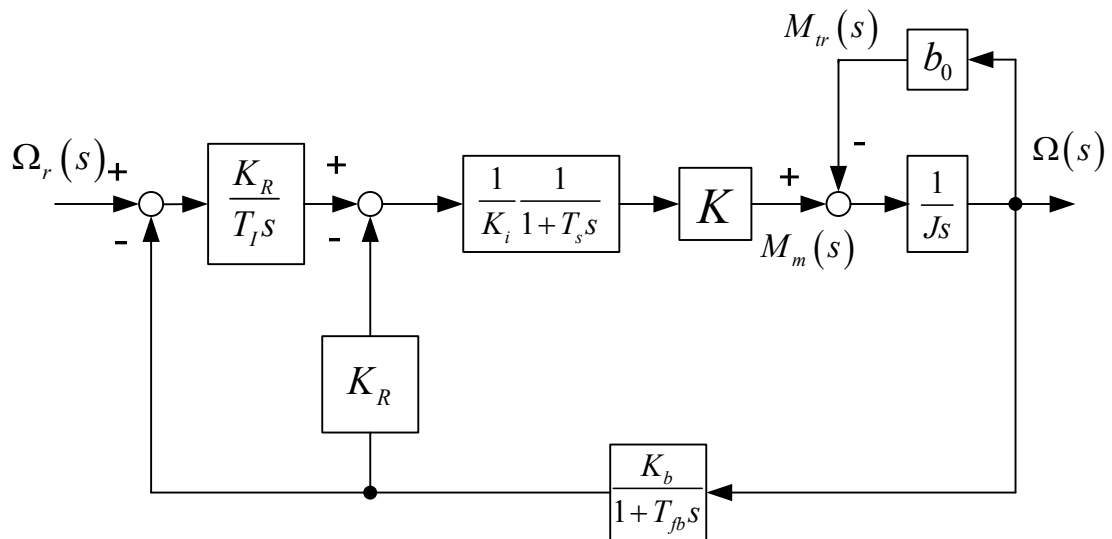
- Nacrtati strukturnu blokovsku shemu sustava upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom uz korištenje modificiranog PI regulatora.
- Odrediti prienosnu funkciju zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje uz zamjenu malih (nedominantnih) vremenskih konstanti u regulacijskom krugu brzine vrtnje jednom nadomjesnom vremenskom konstantom.
- Odrediti parametre modificiranog PI regulatora korištenjem modulnog optimuma. Eventualno dobivene nule kompenzirati prefiltrom.
- Zašto je potrebno ograničavati referentnu vrijednost struje armature u kaskadnoj strukturi sustava upravljanja brzinom vrtnje?

Rješenje:

- strukturnu blokovsku shemu sustava upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom uz korištenje modificiranog PI regulatora



- nadomještanjem podređenog regulacijskog kruga armaturne struje s prijenosnom funkcijom prvog reda (pripadni prefiltar krati nulu mjernog člana armaturne struje) dobije se



- sada se može odrediti prijenosna funkcija zatvorenog kruga

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{K_b} \frac{1}{\frac{T_I K_i J T_s^*}{K_b K_R K} s^3 + \frac{T_I K_i J + T_I K_i T_s^* b_0}{K_b K_R K} s^2 + \frac{T_I K_i b_0 + T_I K_R K_b K}{K_b K_R K} s + 1}$$

- potrebno je primijetiti da prijenosna funkcije zatvorenog kruga posjeduje nulu zbog utjecaja mjernog člana brzine vrtnje, no ona se rješava pripadnim prefiltrom

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{K_b} \frac{1 + T_{fb} s}{\frac{T_I K_i J T_s^*}{K_b K_R K} s^3 + \frac{T_I K_i J + T_I K_i T_s^* b_0}{K_b K_R K} s^2 + \frac{T_I K_i b_0 + T_I K_R K_b K}{K_b K_R K} s + 1}$$

- koeficijenti karakterističnog polinoma su sada

$$a_0 = 1$$

$$a_1 = \frac{T_I K_i b_0 + T_I K_R K_b K}{K_b K_R K}$$

$$a_2 = \frac{T_I K_i J + T_I K_i T_s^* b_0}{K_b K_R K}$$

$$a_3 = \frac{T_I T_s^* K_i J}{K_b K_R K}$$

- izrazi za modulni optimum sada glase

$$a_1^2 - 2a_0 a_2 = 0$$

$$a_2^2 - 2a_1 a_3 = 0$$

- sređivanjem dobivaju se parametri modificiranog PI regulatora

$$K_R = 12,72$$

$$T_I = 0,051[s]$$

Ograničavanje armaturne struje je potrebno da bi se sustav upravljanja prilagodio istosmjernom motoru kojim upravlja kako kroz njega u normalnom režimu rada ne bi tekla veća struja od najveće dozvoljene te kao zaštitna funkcija da u slučaju kratkog spoja u krugu armature ne poteče struja veća od najveće dozvoljene.