

## Pismeni ispit

9. srpnja 2018.

Ime i Prezime:

Matični broj:

Napomena: Zadatke obavezno predati s rješenjima nakon završetka testa.

## 1. zadatak (8 bodova)

Istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor ima sljedeće podatke:  $P_n = 2,2 \text{ kW}$ ,  $I_n = 22,5 \text{ A}$ ,  $U_n = 120 \text{ V}$ ,  $n_n = 390 \text{ min}^{-1}$  i otpor armature  $R_a = 0,7 \Omega$ . Moment trenja i ventilacije motora je **konstantan**.

- a) (2 boda) Odrediti moment tereta kojim je motor opterećen ako se uz nazivni napon vrti brzinom  $n = 440 \text{ min}^{-1}$ ? Nacrtati momentne karakteristike tereta i motora te označiti radnu točku.
- b) (2 boda) Ako se motor optereti momentom tereta  $M_t = 40 \text{ Nm}$ , koliko treba iznositi napon napajanja da se motor vrti brzinom  $n = 200 \text{ min}^{-1}$ ? Nacrtati momentne karakteristike tereta i motora te označiti radnu točku.
- c) (4 boda) Ako na motor priključimo teret momentne karakteristike  $M_t = k n^2 \text{ Nm}$ , pri nazivnom naponu i nazivnom toku teče struja  $I = 20 \text{ A}$ . Kojom brzinom bi se vrtio motor ako bi se uzbuđna struja (tok) motora smanjila za 2% u odnosu na nazivnu vrijednost?

## 2. zadatak (14 bodova)

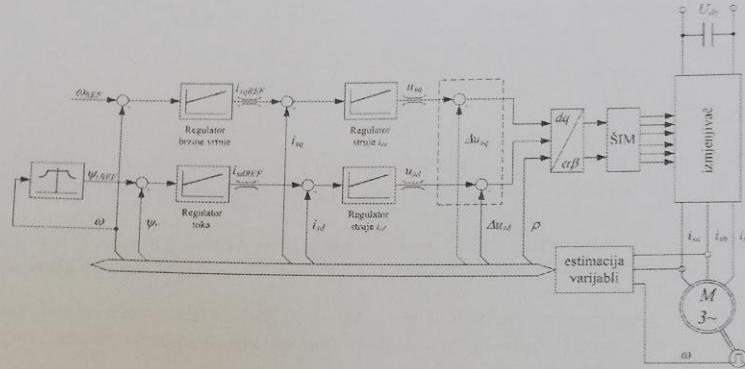
Asinkroni motor nazivnih podataka:  $U_n = 400 \text{ V}$ ,  $P_n = 5 \text{ kW}$ ,  $n_n = 1430 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_n = 50 \text{ Hz}$ ,  $M_{pr}/M_n = 3$ , namot u spoju zvijezda, skalarno je upravljan U/f metodom u otvorenoj petlji. Motor pokreće stroj za obradu metala čija je momentna karakteristika dana izrazom  $M_t = k/n \text{ Nm}$ . Gubici trenja i ventilacije motora se zanemaruju. Pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji motor je opterećen s 50% nazivnog momenta.

- a) (6 bodova) Odrediti zadanu (referentnu) frekvenciju uz koju bi brzina vrtnje motora bila  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ . Koliki je moment tereta pri novoj referentnoj frekvenciji? Nacrtati momentne karakteristike motora i tereta, te naznačiti karakteristične točke.
- b) (2 boda) Kolika je minimalna dozvoljena referentna frekvencija s kojom opisani pogon može trajno raditi? Obrazložiti!
- c) (6 bodova) Odrediti zadanu (referentnu) frekvenciju uz koju bi moment motora bio  $M = 0,75 M_n$  ako se motor upravlja u **zatvorenoj** petlji (PI regulator). Kolika je referentna brzina u tom slučaju? Nacrtati momentne karakteristike motora i tereta, te naznačiti karakteristične točke.



## 3. zadatak (11 bodova)

Za upravljanje brzinom vrtnje kaveznog asinkronog motora koristi se struktura upravljanja prikazana na slici 1. Motor se vrti brzinom koja je jednaka 80% nazivne brzine i opterećen je s 50% nazivnog momenta. Potrebno je:

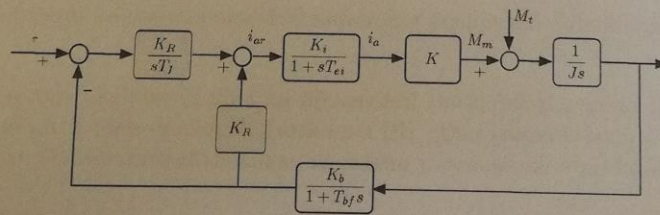


Slika 1: Sustav za regulaciju brzine s vektorski upravljanim asinkronim motorom

- (6 bodova) Kvalitativno skicirati odzive struja  $i_{sd}(t)$  i  $i_{sq}(t)$ , te brzine vrtnje  $\omega(t)$  za slučaj da se motoru poveća referentna vrijednost brzine na 120% nazivne brzine, a moment tereta ostane nepromijenjen.
- (5 bodova) U istom  $d, q$  koordinatnom sustavu skicirati položaj vektora magnetskog toka rotora, položaj vektora struje statora te  $d$  i  $q$  komponente struje statora u početnom stacionarnom stanju ( $n = 80\% n_n$ ,  $M_t = 50\% M_n$ ) te u stacionarnom stanju koje je nastupilo nakon promjene referentne vrijednosti brzine ( $n = 120\% n_n$ ,  $M_t = 50\% M_n$ ).

## 4. zadatak (16 bodova)

Nadređena petlja upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzбудom prikazana je blokovskom shemom na slici 2. Pritom su:  $K_i = 1$ ,  $T_{ei} = 5 \text{ ms}$ ,  $K = 1,33 \text{ Vs/rad}$  i  $J = 3 \text{ kgm}^2$ ,  $K_f = 1$ ,  $T_{fb} = 1 \text{ ms}$ . Potrebno je:



Slika 2: Blokovska shema upravljanja brzinom vrtnje

- (4 boda) Odrediti prijenosnu funkciju zatvorenog kruga.
- (5 bodova) Odrediti parametre modificiranog PI regulatora brzine vrtnje tako da nadomjesna vremenska konstanta zatvorenog kruga iznosi  $T_e = 0,1 \text{ s}$ , a karakteristični odnos  $D_2 = 0,5$ .
- (3 boda) Odrediti prefiltar u grani referentne vrijednosti brzine vrtnje kojim se krata sve nule.
- (4 boda) Je li moguće promjenom prefiltara u grani referentne vrijednosti osigurati točnost slijeđenja linearno rastuće referentne veličine? Obrazložiti.





LJIR-2018

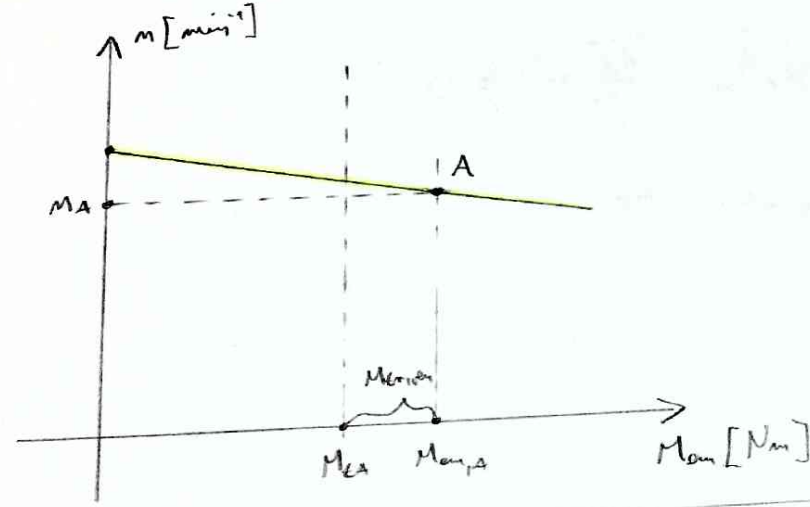
①  $P_n = 2.2 \text{ kW}$   
 $I_n = 22.5 \text{ A}$   
 $U_n = 120 \text{ V}$   
 $n_n = 390 \text{ min}^{-1}$   
 $R_a = 0.7 \Omega$

$\rightarrow C_e = \frac{U_n - R_a I_n}{\omega_n} = c_m = 2.5526$   
 $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 53.87 \text{ Nm}$   
 $M_{n,em} = I_n c_m = 57.43 \text{ Nm}$   
 $M_{cr,ven} = M_{n,em} - M_n = 3.57 \text{ Nm}$

a)  $n_A = 440 \text{ min}^{-1} \rightarrow I_a = \frac{1}{R_a} (U_n - c_e \omega_A) =$   
 $M_{eA} = ?$

$M_{em,A} = M_{eA} + M_{cr,ven}$

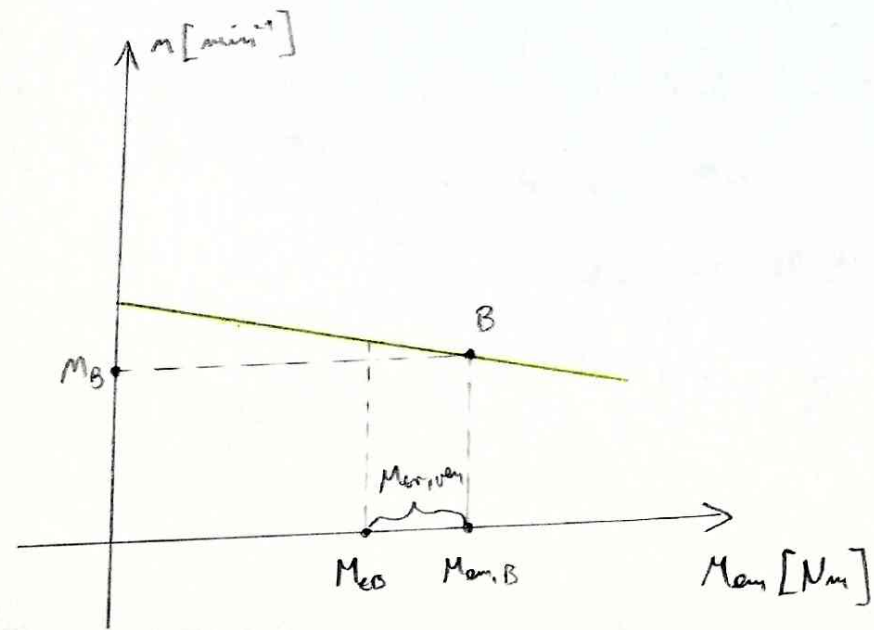
$M_{eA} = c_m I_a - M_{cr,ven} \rightarrow M_{eA} = 5.13 \text{ Nm}$



b)  $M_{eB} = 40 \text{ Nm}$   
 $n_B = 200 \text{ min}^{-1}$

$U_a - R_a I_a = c_e \omega_B$   
 $c_m I_a = M_{eB} + M_{cr,ven}$

$U_a = 65.41 \text{ V}$   
 $I_a = 17.07 \text{ A}$



$$c) M_{ec} = h \cdot n^2 \quad \rightarrow \quad \omega_c = \frac{U_n - \bar{I}_a R_a}{C_e} = 41.53 \text{ rad/s}$$

$$\bar{I}_a = 20 \text{ A}$$

$$M_{ec} = M_{em,c} - M_{er,ren}$$

$$h \cdot \left( \frac{30}{\pi} \omega_c \right)^2 = \bar{I}_a \cdot C_m - M_{er,ren}$$

$$h = 3.0198 \cdot 10^{-4}$$

$$\phi^* = 0.98 \phi_n \rightarrow C_e^* = 0.98 C_e$$

$$\bar{I}_a^* R_a = U_n - \omega_c^* C_e^*$$

$$h M_c^{*2} = \bar{I}_a^* C_m^* - M_{er,ren}$$

$$h \left( \frac{30}{\pi} \right)^2 \omega_c^{*2} = \frac{C_m}{R_a} (U_n - \omega_c^* C_e^*) - M_{er,ren}$$

$$h \left( \frac{30}{\pi} \right)^2 \omega_c^{*2} + \frac{C_m C_e^*}{R_a} \omega_c^* + M_{er,ren} - \frac{C_m}{R_a} U_n = 0$$

$$\omega_{c1}^* = 42.11 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{c2}^* = -366.75 \text{ rad/s}$$

$$n_c^* = 402.11 \text{ min}^{-1}$$

②  $U_n = 400 \text{ V}$   
 $P_n = 5 \text{ kW}$   
 $n_n = 1430 \text{ min}^{-1}$   
 $f_n = 50 \text{ Hz}$   
 $M_{e1} = 0.5 M_n$

$$\rightarrow M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 33.39 \text{ Nm}$$

$$M_{sn} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$\frac{M_{e1}}{M_n} = \frac{M_{sn} - M_1}{M_{sn} - M_n} \rightarrow M_1 = 1465 \text{ min}^{-1}$$

$$k = M_1 M_{e1} = 24457.55$$

a)  $M_A = 1200 \text{ min}^{-1}$

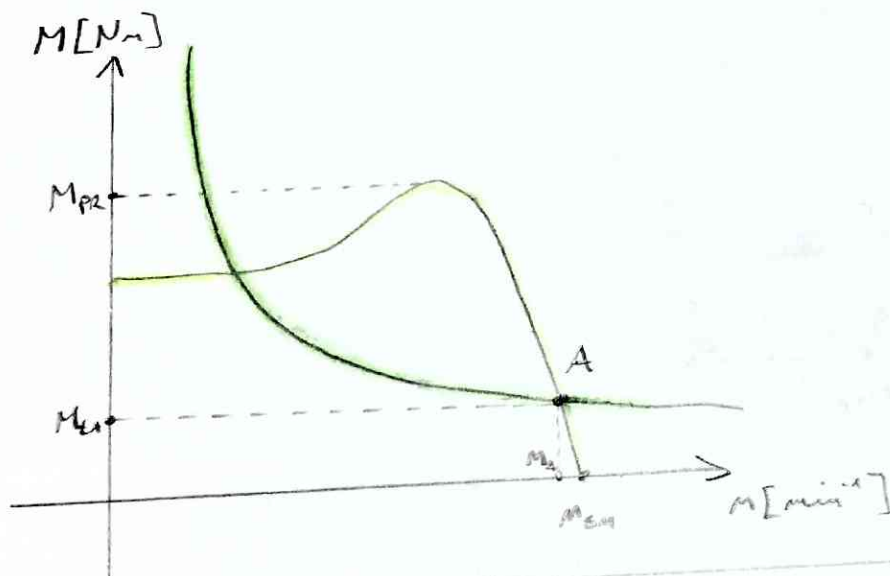
$$M_{eA} = \frac{k}{M_A} \Rightarrow$$

$$M_{eA} = 20.38 \text{ Nm}$$

$$\frac{M_{eA}}{M_n} = \frac{M_{sA} - M_A}{M_{sn} - M_n} \rightarrow M_{sA} = 1242.73 \text{ min}^{-1}$$

$$30 f_A = M_{sA}$$

$$f_A = 41.42 \text{ Hz}$$



b)  $M_{eB} = M_n \rightarrow M_B = \frac{k}{M_{eB}} = 732.5 \text{ min}^{-1}$

$$\frac{M_{eB}}{M_n} = \frac{M_{sB} - M_B}{M_{sn} - M_n} \rightarrow M_{sB} = 802.5 \text{ min}^{-1}$$

$$30 f_B = M_{sB}$$

$$f_B = 26.75 \text{ Hz}$$

$$f_{min} = f_B = 26.75 \text{ Hz}$$

$$c) M_{ec} = 0.75 M_m$$

$$M_c = \frac{h}{M_{ec}} = 976.67 \text{ min}^{-1}$$

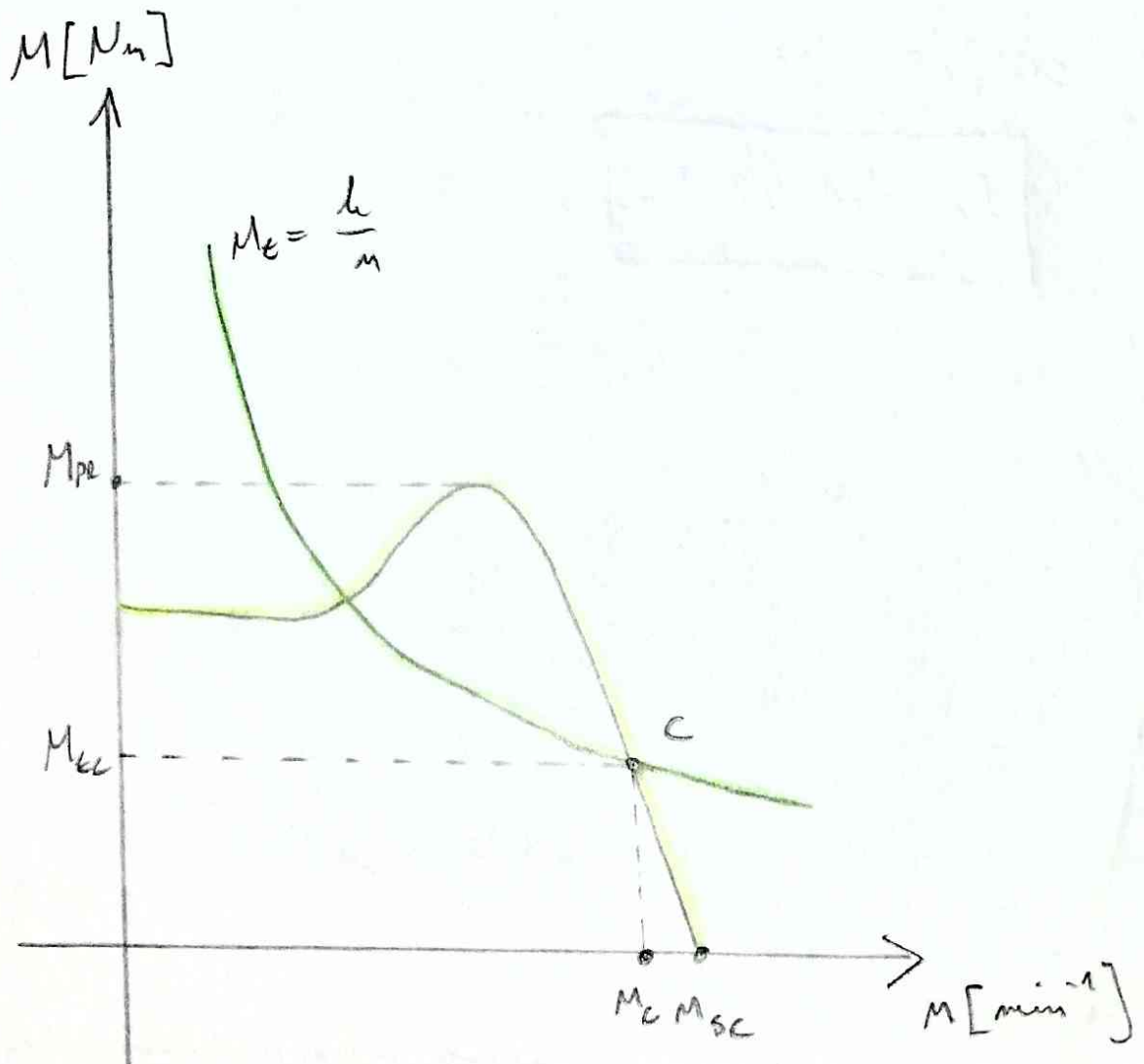
$$\frac{M_{ec}}{M_m} = \frac{M_{sc} - M_c}{M_{sn} - M_m} \rightarrow$$

$$M_{sc} = 1029.17 \text{ min}^{-1}$$

$$30 f_c = M_{sc}$$

$$f_c = 34.31 \text{ Hz}$$

$$M_{REF} = M_c = 976.67 \text{ min}^{-1}$$



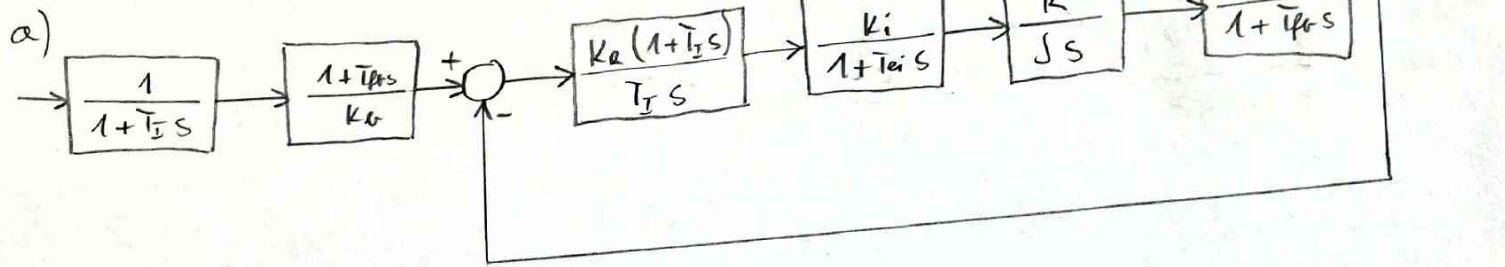


LJIR-2018 (4)

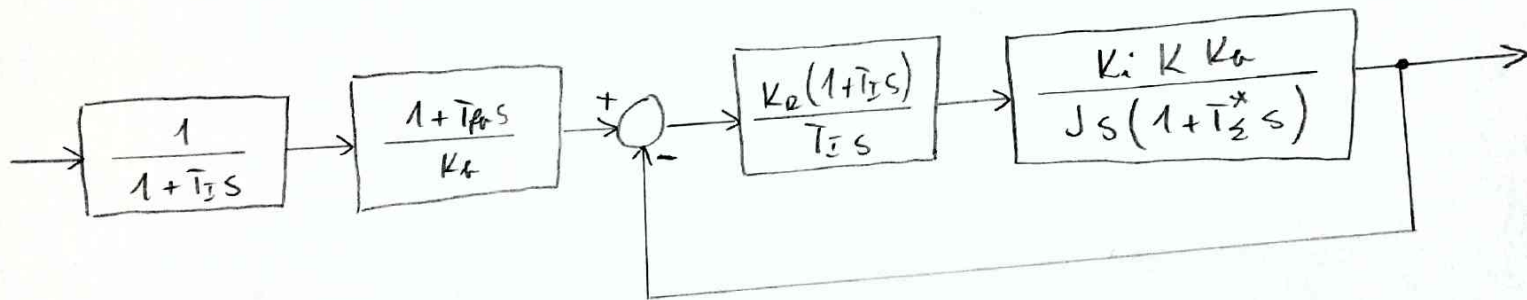
$$K_i = 1, T_{ei} = 5 \text{ ms}$$

$$K = 1.33 \text{ Vs/m}, J = 3 \text{ kg m}^2$$

$$K_{fo} = 1, T_{fo} = 1 \text{ ms}$$



→ NEDOMINANTNE UREM. KONST:  $T_2^* = T_{ei} + T_{fo} = 6 \text{ ms}$



$$G_o(s) = \frac{K_o K_i K K_o (1+T_I s)}{J T_I s^2 (1+T_2^* s)}$$

$$G_r(s) = \frac{K_o K_i K K_o (1+T_I s)}{J T_I T_2^* s^3 + J T_I s^2 + K_o K_i K K_o T_I s + K_o K_i K K_o} \cdot \frac{1}{1+T_I s} \cdot \frac{1+T_{fo} s}{K_o}$$

$$G_r(s) = \frac{1}{\frac{J T_I T_2^*}{K_o K_i K K_o} s^3 + \frac{J T_I}{K_o K_i K K_o} s^2 + T_I s + 1} \cdot \frac{1+T_{fo} s}{K_o}$$

b)  $T_e = 0.1 \text{ s}$

$$D_2 = 0.5$$

$$a_1 = T_I \Rightarrow$$

$$T_I = T_e = 0.1 \text{ s}$$

$$a_2 = D_2 T_e^2$$

$$\frac{J T_e}{K_o K_i K K_o} = D_2 T_e^2 \Rightarrow$$

$$K_o = \frac{J}{K_i K K_o D_2 T_e} = 45.1128$$



c)

$$G_{PF}(s) = \frac{K_R}{1 + T_{f0}s}$$

d)

$$G_{PF}(s) = K_R \frac{1 + T_{f1}s}{1 + T_{f0}s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{s^2} (1 - G_{PF} \cdot G_T) \cdot s \right] = 0$$

LJIR-2018 (5)

$$K_a = 4.5 \text{ A/V}, T_a = 25 \text{ ms}$$

$$K = 1.33 \text{ Vs/mol}, J = 2.4 \text{ kg m}^2$$

$$K_e = 44, T_{mi} = 1.66 \text{ ms}$$

$$K_i = 0.1 \text{ V/A}, T_{fi} = 2 \text{ ms}$$

$$K_b = 0.0318, T_{fb} = 15 \text{ ms}$$

a)

$$G_{P1}(s) = \frac{K_e K_a K_i}{(1 + T_{mi} s)(1 + T_a s)(1 + T_{fi} s)}$$

$$G_{S1}(s) = \frac{K_{S1}}{(1 + \bar{T}_{S1} s)(1 + \bar{T}_{Z1} s)}$$

$$K_{S1} = K_e K_a K_i = 19.8$$

$$\bar{T}_{Z1} = T_{mi} + T_{fi} = 3.66 \text{ ms}$$

$$\bar{T}_{S1} = T_a = 25 \text{ ms}$$

$$K_{R1} = \frac{1}{2 K_{S1}} \frac{\bar{T}_{S1}}{\bar{T}_{Z1}}$$

$$K_{R1} = 0.1751$$

$$G_{PF1}(s) = \frac{K_i}{1 + T_{fi} s}$$

b)  $\alpha = 2$

$$G_{T1}(s) = \frac{1}{2 \bar{T}_{S1} s^2 + 2 \bar{T}_{S1} s + 1} \approx \frac{1}{1 + 2 \bar{T}_{S1} s}$$

$$G_{P2}(s) = \frac{K K_b}{J s (1 + 2 \bar{T}_{S2} s)(1 + T_{fb} s)}$$

$$G_{S2}(s) = \frac{K_{S2}}{T_m s (1 + T_{S2} s)}$$

$$\frac{K_{S2}}{T_m} = \frac{K K_b}{J} = 0.0176$$

$$\bar{T}_{S2} = 2 \bar{T}_{S1} + T_{fb} = 22.32 \text{ ms}$$

$$\bar{T}_{I2} = \alpha^2 \bar{T}_{S2} \rightarrow \bar{T}_{I2} = 89.28 \text{ ms}$$

$$K_{R2} = \frac{1}{\alpha K_{S2}} \frac{T_m}{\bar{T}_{I2}}$$

$$K_{R2} = 1271.1836$$

$$G_{PF2}(s) = \frac{K_b (1 + \bar{T}_{I2} s)}{1 + T_{fb} s}$$

$$c) \varphi_{\min} = 37^\circ$$

$$a = 2.41 \rightarrow$$

$$T_{I_2} = a^2 T_{I_1} = 123.64 \text{ ms}$$

$$k_{I_2} = \frac{1}{a k_{I_1}} \frac{T_{I_1}}{T_{I_2}} = 1054.3242$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_c^* &= b \omega_c \\ \omega_c &= \frac{1}{a T_{I_2}} \end{aligned} \right\}$$

$$\omega_c^* = \frac{b}{a T_{I_2}}$$

$$T_{I_2} \omega_c^* = a^2 T_{I_2} \cdot \frac{b}{a T_{I_2}} = a b$$

$$T_{I_2} \omega_c^* = \frac{b}{a}$$

$$\varphi_{\min} = 180^\circ + \arctan(T_{I_2} \omega_c^*) - \arctan(T_{I_2} \omega_c^*) - 180^\circ$$

$$\varphi_{\min} = \arctan(ab) - \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\varphi_{\min} = \arctan \frac{ab - \frac{b}{a}}{1 + ab \cdot \frac{b}{a}}$$

$$\frac{b}{1+b^2} \frac{a^2-1}{a} = \tan \varphi_{\min}$$

$$b^2 - \frac{a^2-1}{a \tan \varphi_{\min}} b + 1 = 0$$

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= 2.19 \\ b_2 &= 0.46 \end{aligned} \right\}$$

$$J \in [0.46 J_{M1}, 2.19 J_{M1}]$$

