

# Pismeni ispit

22. veljače 2016.

Ime i Prezime:

Matični broj:

Napomena: Zadatke obavezno predati s rješenjima nakon završetka testa.

## 1. zadatak (10 bodova)

Istosmjerni nezavisno uzbudjeni motor ima sljedeće podatke:  $P_n = 18,5 \text{ kW}$ ,  $I_n = 90 \text{ A}$ ,  $U_n = 220 \text{ V}$ ,  $n_n = 1150 \text{ min}^{-1}$  i otpor armature  $R_a = 0,1\Omega$ . Moment trenja i ventilacije motora je konstantan.

- (4 boda) Ako se motor optereti momentom tereta  $M_t = 100 \text{ Nm}$ , koliko treba iznositi napon napajanja da se motor vrti brzinom  $n = 500 \text{ min}^{-1}$ ? Nacrtati momentne karakteristike tereta i motora te označiti radnu točku.
- (3 boda) Ako se motor optereti momentom tereta potencijalnog karaktera čiji je iznos momenta nepoznat, motor radi u režimu generatorskog kočenja i vrti se brzinom  $n = 800 \text{ min}^{-1}$ . Ako se promijeni polaritet napona napajanja (vrijednost napona ostaje ista!), motor se u stacionarnom stanju vrti brzinom  $n = -724 \text{ min}^{-1}$ . Koliki je moment tereta?
- (3 boda) Ako na motor priključimo teret momentne karakteristike  $M_t = k/n \text{ Nm}$ , pri nazivnom naponu teče struja  $I = 30 \text{ A}$ . Kojom brzinom bi se vrtio motor ako bi se uzbudna struja (tok) motora smanjila za 10% u odnosu na nazivnu vrijednost?

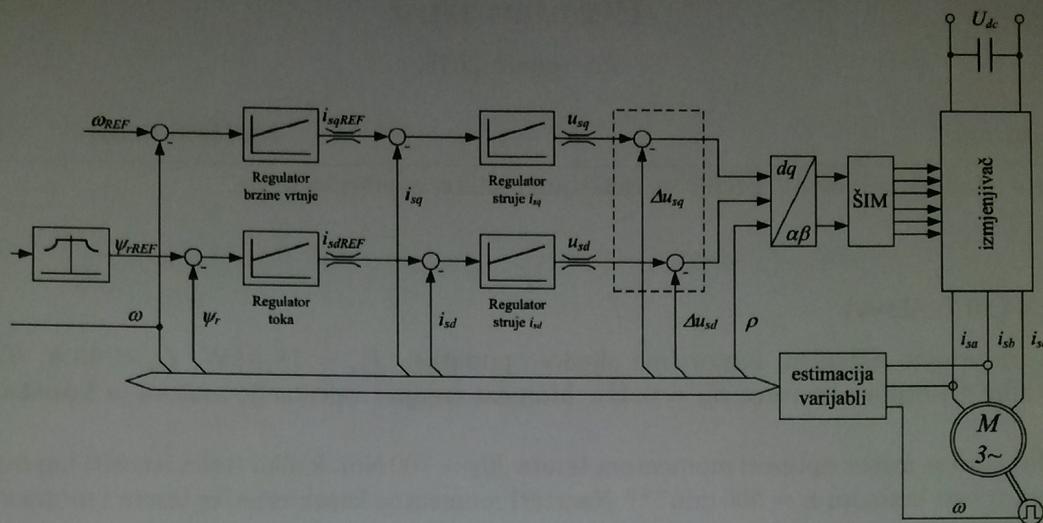
## 2. zadatak (12 bodova)

Asinkroni motor nazivnih podataka:  $U_n = 400 \text{ V}$ ,  $P_n = 7,5 \text{ kW}$ ,  $n_n = 1440 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_n = 50 \text{ Hz}$ ,  $M_{pr}/M_n = 3$ , namot u spoju zvijezda, skalarno je upravljan U/f metodom u otvorenoj petlji. Gubici trenja i ventilacije motora se zanemaruju.

- (3 boda) Odrediti brzinu vrtnje motora pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji ako je motor opterećen konstantnim momentom tereta  $M_t = 20 \text{ Nm}$ . Nacrtati momentne karakteristike motora i tereta te naznačiti nazivnu točku i radnu točku.
- (5 bodova) Ako se na motor priključi matalica za papir čija je momentna karakteristika dana izrazom  $M_t = k * n \text{ Nm}$ , pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji motor se vrti brzinom  $n = 1450 \text{ min}^{-1}$ . Odrediti brzinu vrtnje motora pri referentnoj frekvenciji  $f = 40 \text{ Hz}$ . Nacrtati momentnu karakteristiku tereta te momentne karakteristike motora za nazivnu i referentnu frekvenciju te naznačiti karakteristične točke.
- (4 boda) Motor je upravljan U/f metodom u zatvorenoj petlji pri čemu mjerni član brzine grieši -10% stvarne vrijednosti brzine u cijelom mjernom opsegu (npr. ako je stvarna brzina  $100 \text{ min}^{-1}$ , mjerni član daje  $90 \text{ min}^{-1}$ ). Odrediti zadalu (referentnu) vrijednost brzine ako je na motor priključena matalica za papir iz b)dijela zadatka, a frekvencija (osnovnog harmonika) napona napajanja motora iznosi  $f = 35 \text{ Hz}$ .

## 3. zadatak (8 bodova)

Za upravljanje brzinom vrtnje kavezognog asinkronog motora koristi se struktura upravljanja prikazana na slici 1. Motor se vrti brzinom 20% većom od nazivne brzine i opterećen je s 20% nazivnog momenta. Potrebno je:



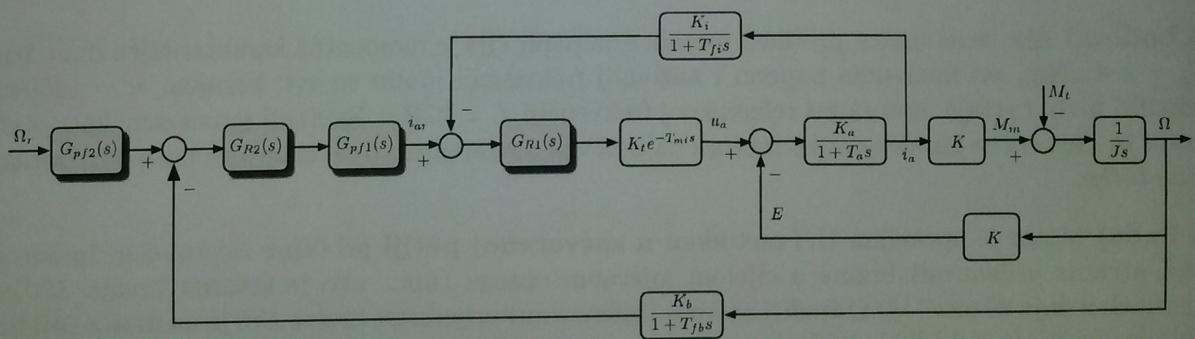
Slika 1: Sustav za regulaciju brzine s vektorski upravljanim asinkronim motorom

- a) **(5 bodova)** Kvalitativno skicirati odzive struja  $i_{sd}(t)$  i  $i_{sq}(t)$ , te brzine vrtnje  $\omega(t)$  za slučaj da se motoru smanji referentna vrijednost brzine vrtnje na 80% nazivne brzine, a moment tereta ostane nepromijenjen.

b) **(3 boda)** U istom  $d,q$  koordinatnom sustavu skicirati položaj vektora magnetskog toka rotora i položaj vektora struje statora u početnom stacionarnom stanju ( $n = 120\% n_n, M_t = 20\% M_n$ ) te u stacionarnom stanju koje je nastupilo nakon promjene referentne vrijednosti brzine ( $n = 80\% n_n, M_t = 20\% M_n$ ).

#### 4. zadatak (15 bodova)

Kaskadna struktura upravljanja brzinom istosmjernog motora prikazana je na slici 2, pri čemu pojedini parametri iznose:  $K_a = 4.5 \text{ A/V}$ ,  $T_a = 0.025 \text{ s}$ ,  $K = 1.33 \text{ Vs/rad}$ ,  $K_t = 44$ ,  $T_{mi} = 1.66 \text{ ms}$ ,  $K_i = 0.1 \text{ V/A}$ ,  $T_{fi} = 2 \text{ ms}$ ,  $K_b = 0.0318$ ,  $T_{fb} = 15 \text{ ms}$ ,  $J = 2.4 \text{ kg m}^2$ .



Slika 2: Blokovska shema kaskadnog upravljanja brzinom DC motora s nezavisnom uzbudom

Potreбно je:

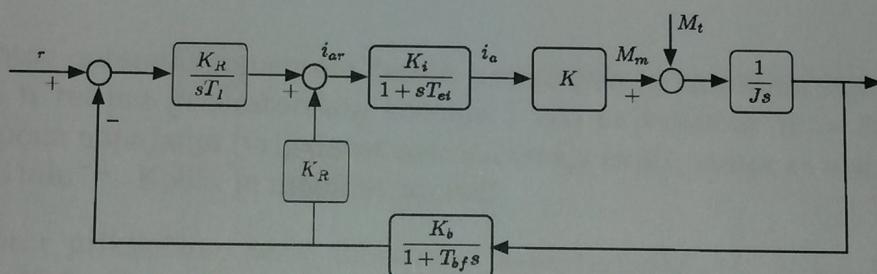
- a) **(4 boda)** Projektirati PI regulator struje armature  $G_{R1}(s)$  prema tehničkom optimumu kao i prefiltar referentne vrijednosti struje armature  $G_{pf1}(s)$ .

b) **(4 boda)** Ukoliko se promjeni nadomjesno mrtvo vrijeme pratvarača na  $T_{mi} = 3ms$ , uz parametre regulatora određene u a) dijelu zadatka, koliko će pri iznositi karakteristični faktor prigušenja  $\zeta$ ?

- c) **(3 boda)** Pretpostavimo da je brzina vrtnje regulirana klasičnim PI regulatorom  $G_{R2} = K_R \frac{1+T_I s}{T_I s}$  koji je projektiran po simetričnom optimumu. Pretpostavimo da optimalno pojačanje PI regulatora brzine vrtnje iznosi  $K_R = K_R^*$ . Potrebno je odrediti koje od ova dva pojačanja rezultira bržim odzivom i većim nadvišenjem  $K_R = 10K_R^*$  ili  $K_R = 0.1K_R^*$ . Objasniti.
- d) **(4 boda)** Ukoliko zamjenimo mjerni član brzine, mjernim članom koji ima manju vremensku konstantu  $T_{fb} = 0.5ms$ , koliko će tada iznositi fazno osiguranje uz pretpostavku da je PI regulator brzine vrtnje projektiran po simetričnom optimumu uz  $a = 2.41$ .
- Napomena: Nagib karakteristike amplitudno frekvencijske karakteristike otvorenog kruga u okolini presječne frekvencije iznosi -20 dB/dek.

### 5. zadatak (15 bodova)

Nadređena petlja upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom prikazana je blokovskom shemom na slici 3. Pritom su:  $K_i = 1$ ,  $T_{ei} = 5 \text{ ms}$ ,  $K = 1.33 \text{ Vs/rad}$  i  $J = 3 \text{ kgm}^2$ ,  $K_{fb} = 1$ ,  $T_{fb} = 1 \text{ ms}$ . Potrebno je:



Slika 3: Blokovska shema upravljanja brzinom DC motora s nezavisnom uzbudom

- a) **(5 bodova)** Odrediti prijenosnu funkciju zatvorenog kruga.
- b) **(5 bodova)** Odrediti parametre modificiranog PI regulatora brzine vrtnje tako da nadomjesna vremenska konstanta zatvorenog kruga iznosi  $T_e = 0.1s$ , a karakteristični odnos  $D_2 = 0.5$ .
- c) **(5 bodova)** Slijedi li sustav bez prefiltrata linearno rastuću referentnu veličinu? Objasniti.

$$\textcircled{1} \quad P_m = 18.5 \text{ kW} \quad \rightarrow \quad c_e = \frac{U_m - I_m R_a}{\omega_m} = c_m = 1.7521$$

$$I_m = 90 \text{ A}$$

$$U_m = 220 \text{ V}$$

$$\omega_m = 1150 \text{ min}^{-1}$$

$$R_a = 0.1 \Omega$$

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 153.62 \text{ Nm}$$

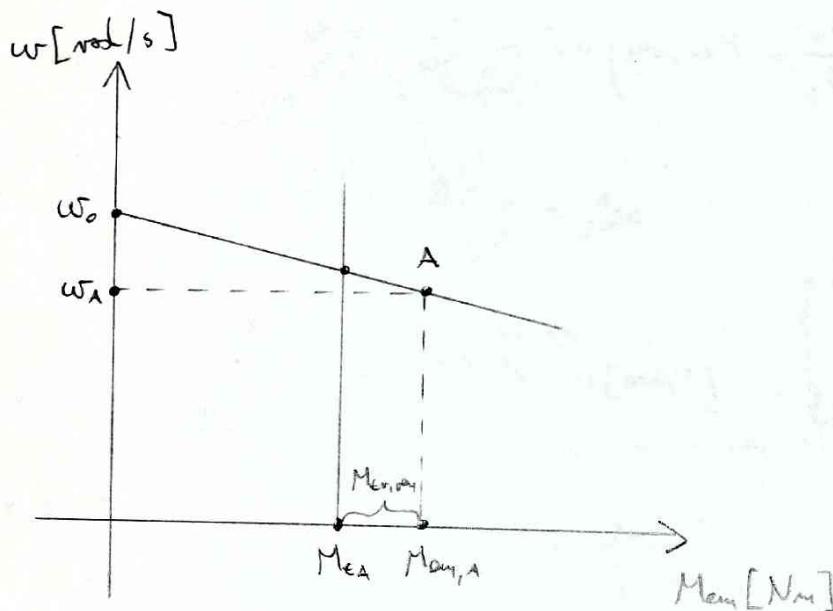
$$M_{em,m} = c_m I_m = 157.69 \text{ Nm}$$

$$M_{er,ven} = M_{em,m} - M_m = 4.07 \text{ Nm}$$

$$\text{a) } M_{eA} = 100 \text{ Nm} \quad \rightarrow \quad I_a = \frac{M_{eA} + M_{er,ven}}{c_m} = 59.4 \text{ A}$$

$$\omega_A = 500 \text{ min}^{-1}$$

$$U_a = c_e \omega_A + I_a R_a \quad \rightarrow \quad U_a = 97.68 \text{ V}$$



$$\text{b) } M_B = 800 \text{ min}^{-1} \rightarrow \text{GEN. REZIM} \Rightarrow U_a, -M_{eB}$$

$$M_B^* = -724 \text{ min}^{-1}, -U_a \rightarrow \text{MOT. REZIM} \Rightarrow -M_{eB}$$

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

$$c_e \omega_B^* = U_a - I_a^* R_a, \quad I_a = \frac{-M_{eB} - M_{er,ven}}{c_m}$$

$$U_a = 140.04 \text{ V}$$

$$M_{eB} = 122.16 \text{ Nm}$$

$$c) M_e = \frac{h}{m} \rightarrow w_c = \frac{U_m - I_a R_a}{C_e} = 123.85 \text{ rad/s}$$

$$I_a = 30 \text{ A}$$

$$U_a = U_m$$

$$M_{ec} + M_{er,ven} = C_m I_a$$

$$\frac{h}{m} + M_{er,ven} = C_m I_a$$

$$h = \frac{30}{\pi} w_c (C_m I_a - M_{er,ven}) = 57353.71$$

$$\phi^* = 0.9 \phi_u \rightarrow C_e^* = C_m^* = 0.9 C_e = 1.5769$$

$$\rightarrow \frac{h}{M_e^*} = C_m^* I_a^* - M_{er,ven} \quad | \quad w_c^* = \frac{U_m - I_a^* R_a}{C_e^*}$$

$$- \frac{C_m^* C_e^*}{R_a} w_c^{*2} + \left( C_m \frac{U_u}{R_a} - M_{er,ven} \right) w_c^* - \frac{h \bar{u}}{30} = 0$$

$$w_{c_1}^* = 137.6 \text{ rad/s}$$

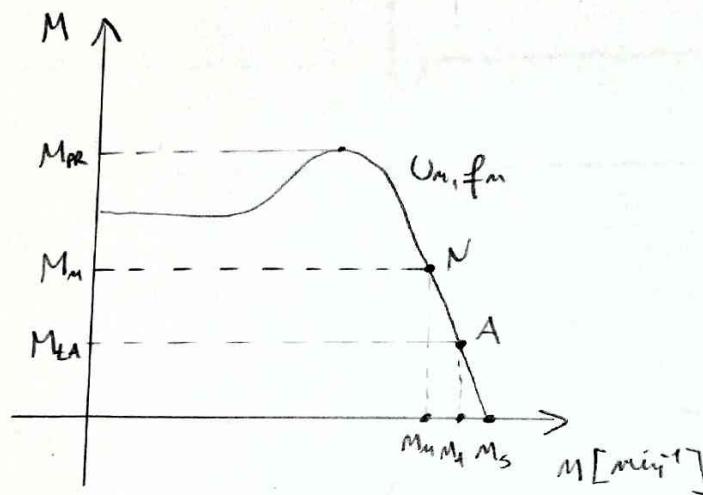
$$w_{c_1}^* = 1.76 \text{ rad/s}$$

$$M_{c_1}^* = 1313.95 \text{ min}^{-1}$$

(2)  $U_n = 400 \text{ V}$   $\rightarrow n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$  ( $p=2$ )  
 $P_m = 7.5 \text{ kW}$   $M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 49.74 \text{ Nm}$   
 $n_n = 1440 \text{ min}^{-1}$   
 $f_n = 50 \text{ Hz}$   
 $M_{pk} = 3 M_m$

a)  $M_{ea} = 20 \text{ Nm}$

$$\frac{M_{ea}}{M_m} = \frac{n_{sm} - n_a}{n_{sm} - n_n} \rightarrow n_a = 1475.87 \text{ min}^{-1}$$



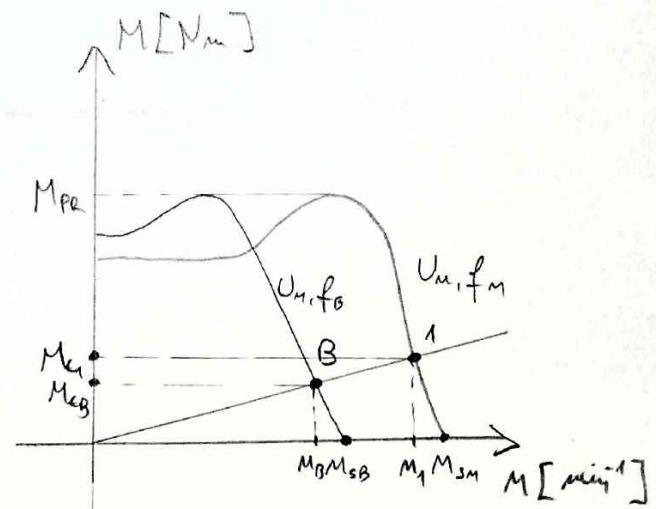
b)  $M_t = k \cdot M$   $\rightarrow \frac{M_{e1}}{M_m} = \frac{n_{sm} - n_1}{n_{sm} - n_n} \rightarrow n_1 = 41.45 \text{ min}^{-1}$   
 $n_1 = 1450 \text{ min}^{-1}$   $k = \frac{M_{e1}}{M_1} = 0.0286$

$f_B = 40 \text{ Hz} \rightarrow n_{sb} = 1200 \text{ min}^{-1}$

$$\frac{M_{eB}}{M_m} = \frac{n_{sb} - n_B}{n_{sm} - n_n}$$

$k(n_{sm} - n_n) M_B = M_m n_{sb} - M_m n_B$

$M_B = 1160 \text{ min}^{-1}$



$$c) f_c = 35 \text{ Hz} \rightarrow M_{sc} = 1050 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{cc} = k M_c$$

$$\frac{M_{cc}}{M_m} = \frac{M_{sc} - M_c}{M_{sm} - M_m}$$

$$k M_c (M_{sm} - M_m) = M_m M_{sc} - M_m M_c$$

$$M_c [k (M_{sm} - M_m) + M_m] = M_m M_{sc}$$

$$M_c = 1015 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{REF} = 0.9 M_c$$

$$M_{REF} = 913.5 \text{ min}^{-1}$$

3.

$$M = 1.2 M_n$$

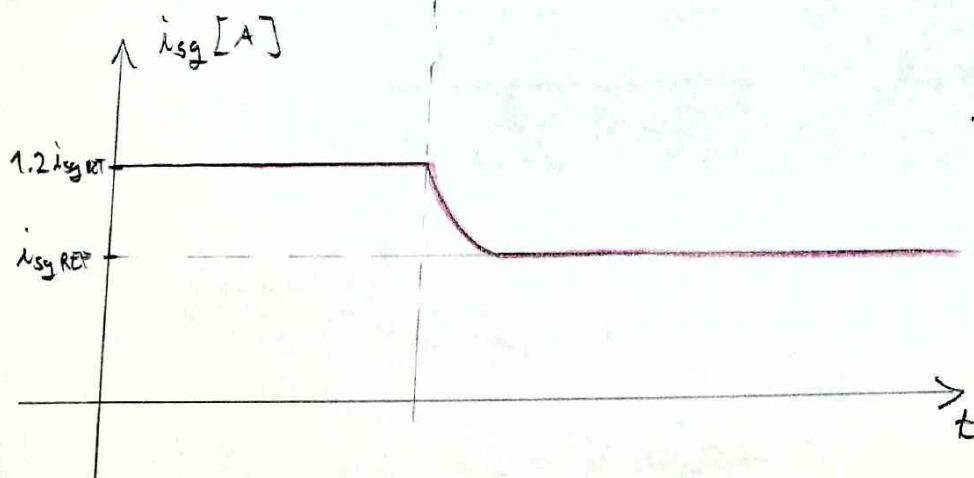
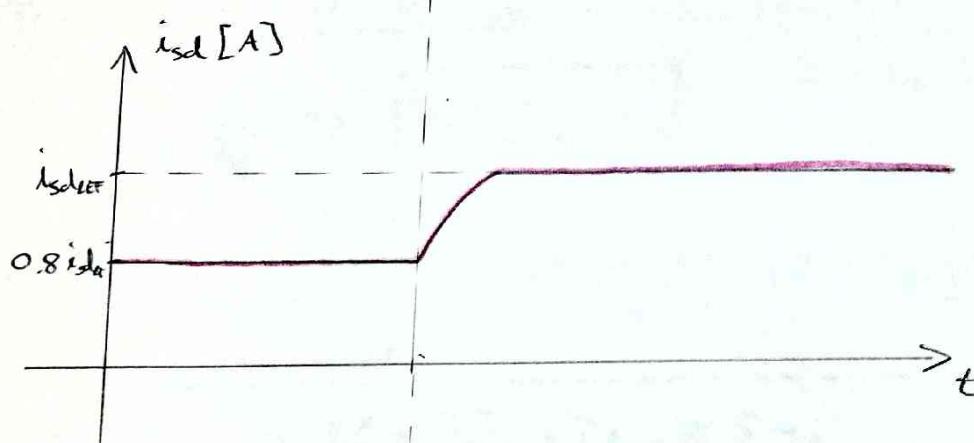
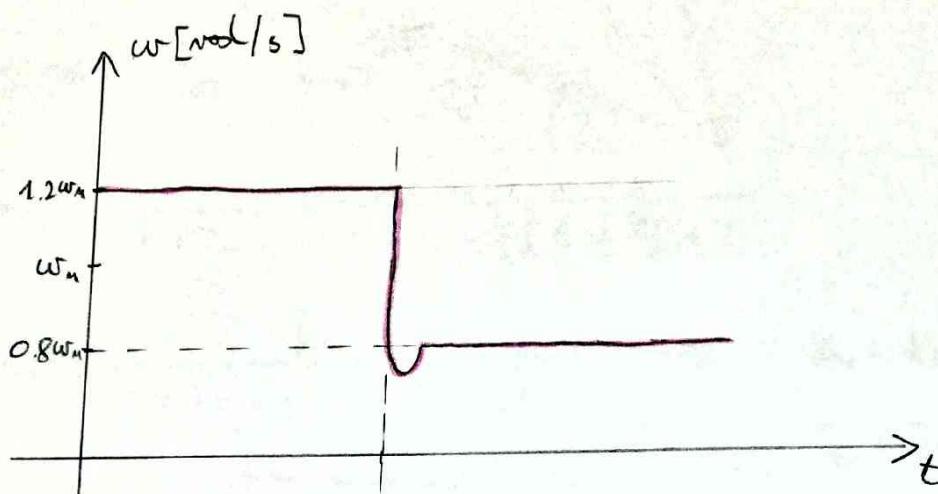
$$M_e = 0.2 M_n$$

$$M^* = 0.8 M_n$$

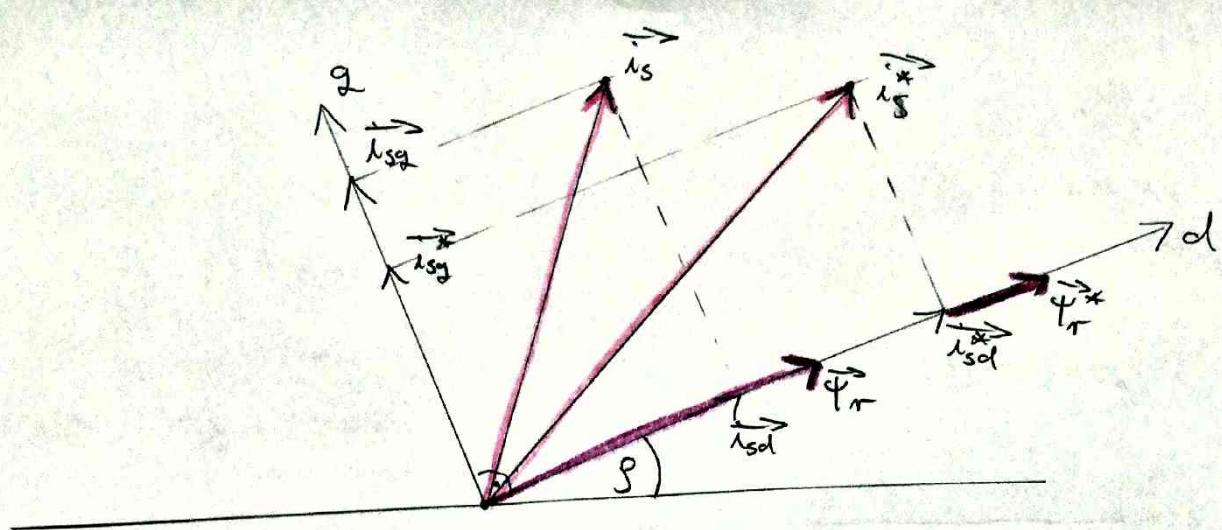
$$M_e^* = M_e$$


---

a)



b)



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

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

$$K_t = 44, T_{m1} = 1.66 \text{ ms}$$

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

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

$$a) G_{pi}(s) = \frac{K_t K_a K_i}{(1+T_{m1}s)(1+T_a s)(1+T_{fi}s)}$$

$$G_{s1}(s) = \frac{K_{s1}}{(1+T_{I1}s)(1+T_{E1}s)} \rightarrow K_{s1} = K_t K_a K_i = 19.8$$

$$T_{s1} = T_{m1} + T_{fi} = 3.66 \text{ ms}$$

$$T_{I1} = T_a \Rightarrow T_{I1} = 25 \text{ ms}$$

$$K_{I1} = \frac{1}{2K_{s1}} \frac{T_{s1}}{T_{I1}} \Rightarrow K_{I1} = 0.1725$$

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

$$b) T_m^* = 3 \text{ ms} \rightarrow T_E^* = T_m^* + T_{fi} = 5 \text{ ms}$$

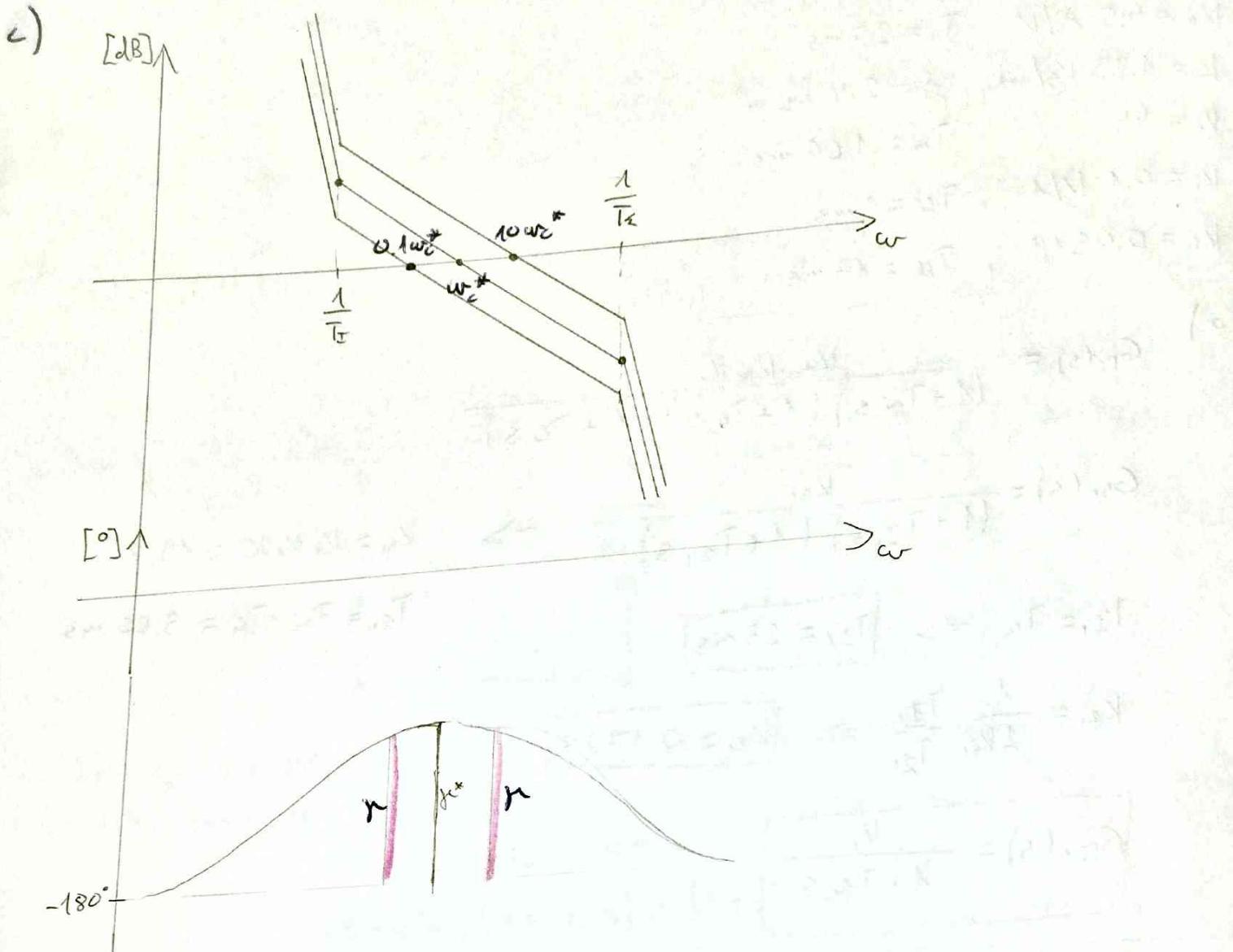
$$G_{r1}(s) = \frac{1}{\frac{T_E^* T_{I1}}{K_{I1} K_{s1}} s^2 + \frac{T_{I1}}{K_{I1} K_{s1}} s + 1}$$

$$K_{I1} K_{s1} = \frac{T_{s1}}{2 T_{E1}}$$

$$G_{r1}(s) = \frac{1}{2 T_{E1}^* T_{s1} s^2 + 2 T_{E1} s + 1}$$

$$\frac{1}{\omega_n^2} = 2 T_{E1}^* T_{s1} \rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{1}{2 T_{E1}^* T_{s1}}}$$

$$2 \frac{g}{\omega_n} = 2 T_{E1} \rightarrow g = \sqrt{\frac{T_{E1}}{2 T_{E1}^*}} \rightarrow g = 0.605$$



$$K_e = 10 K_a^* \rightarrow \omega_c = 10 \omega_c^*$$

$$K_a = 0.1 K_e^* \rightarrow \omega_c = 0.1 \omega_c^*$$

→ pojačanje  $K_e = 10 K_a^*$  rezultira bržim odzivom jer je veća presečna frekvencija  $\omega_c$  tj. vremenska konstanta je manja

→ nadvišenje je jednako za oba pojačanja jer je fazna kar. simetrična, a amplitudna je jednako pomaknuta u oba smjera

$$d) \quad a = 2.41$$

$$G_{P_2}(s) = \frac{K K_B}{J s (1 + 2T_{I_1} s)(1 + T_{P_2} s)}$$

$$G_{S_2}(s) = \frac{K_{S_2}}{T_u s (1 + T_{I_2} s)} \quad \rightarrow \quad \frac{K_{S_2}}{T_u} = \frac{K K_B}{J} = 0.0176$$

$$T_{I_2} = a^2 T_{I_1} \quad \rightarrow \quad T_{I_2} = 129.64 \text{ ms} \quad T_{I_2} = 2T_{I_1} + T_{P_2} = 22.32 \text{ ms}$$

$$K_{R_2} = \frac{1}{a K_{S_2}} \frac{T_u}{T_{I_2}} \quad \rightarrow \quad K_{R_2} = 1054.9242$$

$$T_{P_2}^* = 0.5 \text{ ms} \quad \rightarrow \quad T_{I_2}^* = 2T_{I_1} + T_{P_2}^* = 7.82 \text{ ms}$$

$$G_{a_2}(s) = \frac{K_{R_2} K_{S_2} (1 + T_{I_2} s)}{T_{I_2} T_u s^2 (1 + T_{I_2}^* s)}$$

$$|G_{a_2}(j\omega_c^*)| = 1 \quad \Rightarrow \quad \omega_c^* = 19.73 \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow \gamma = \operatorname{arctg}(T_{I_2} \omega_c^*) - \operatorname{arctg}(T_{I_2}^* \omega_c^*) - 180^\circ + 180^\circ$$

$$\boxed{\gamma = 59.87^\circ}$$

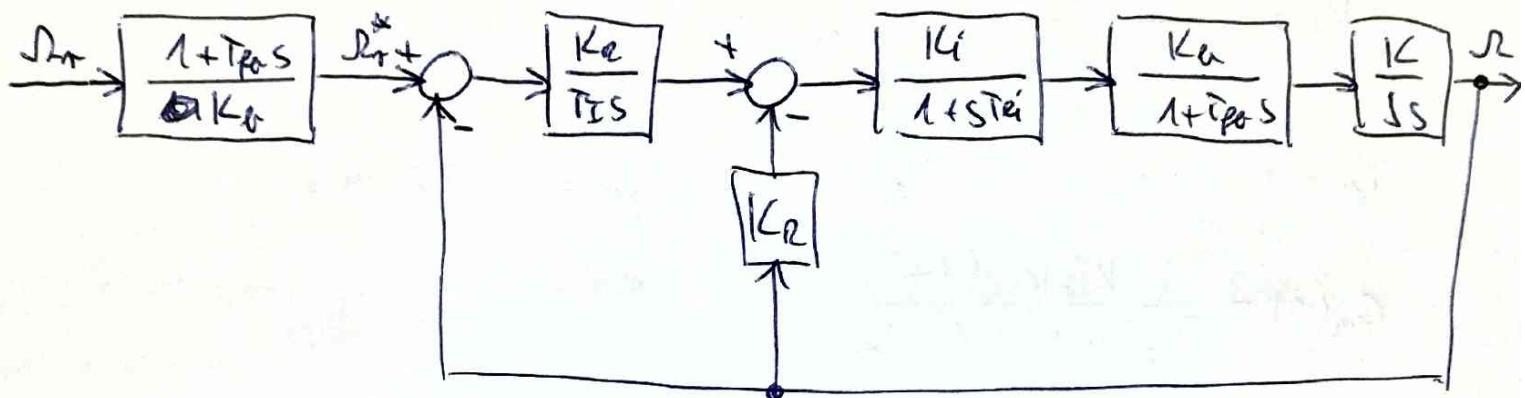
$$5. K_i = 1, T_{ei} = 5 \text{ ms}$$

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

$$K_a = 1, T_{fa} = 1 \text{ ms}$$

a)

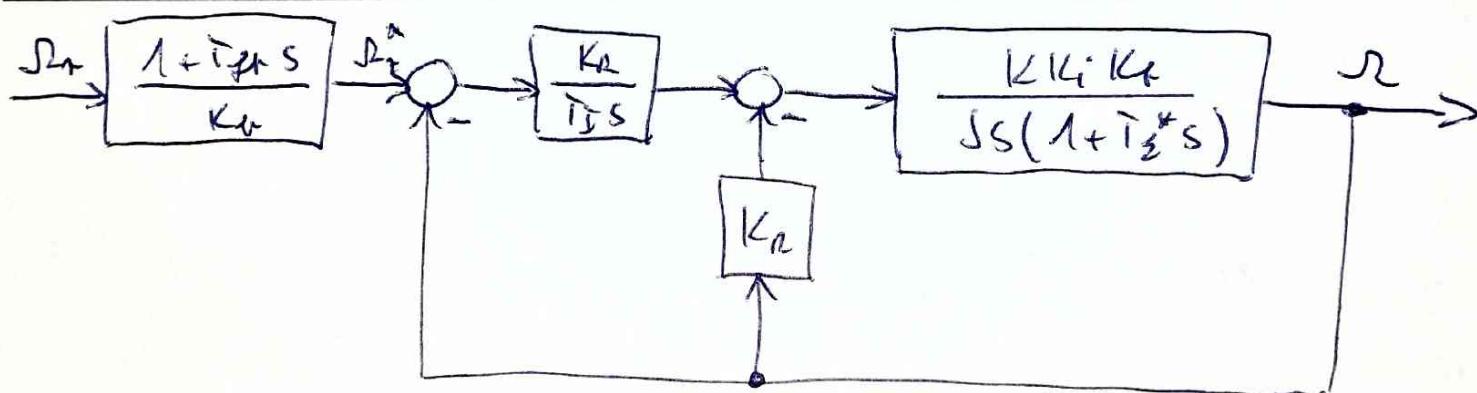
$$G_r(s) = \frac{1}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}$$



•  $T_{ei}$  i  $T_{fa}$  su predominante vrem. konstante pa se mogu nadomjestiti:

$$T_3^* = T_{ei} + T_{fa} = 6 \text{ ms}$$

$$(1+sTei)(1+Tpos s) = (1+T_3^* s)$$



$$G_r(s) = \frac{R}{R_r} = \frac{1+T_{pos}}{K_a} \frac{1}{\frac{J T_3^* T_i}{K K_i K_a K_d} s^3 + \frac{J T_i}{K K_i K_a K_d} s^2 + T_{is} s + 1}$$

$$b) T_e = 0.1s$$

$$D_2 = 0.5$$

$$\Rightarrow a_1 = T_I \quad a_2 = \frac{J T_I}{K_i K_b K_e} \quad a_3 = \frac{J T_e^2 T_I}{K_i K_b K_t K_R}$$

$$\Rightarrow a_1 = T_e \Rightarrow T_I = 0.1s$$

$$\Rightarrow a_2 = D_2 T_e^2$$

$$K_e = \frac{J}{D_2 T_e K_i K_b} \Rightarrow K_e = 45.1128$$

---

$$c) \omega_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ s \left[ 1 - G_r(s) \right] \cdot \frac{1}{s^2} \right\}$$

→ SUSTAV NE SLUEDI LINEARNO PISTOCU  
VELICINU JER SUSTAV SADRZI NULU ZBOG  
UTJECAJA MJERNUC ILANA BRZINE