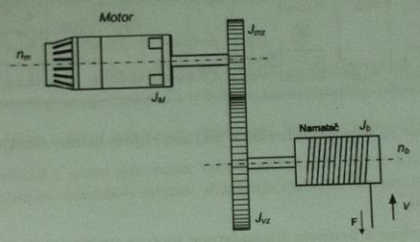
Pismeni ispit

10. rujna 2015.

Napomena: Zadatke obavezno predati s rješenjima nakon završetka testa.

1. zadatak (11 bodova)

Istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom za pogon namatača žice, prema Sl.1, ima slijedeće podatke: $P_n = 2.2\,\text{kW}$, $U_{an} = 120\,\text{V}$, $I_{an} = 22.5\,\text{A}$, $n_n = 390\,\text{min}^{-1}$, $R_a = 0.7\,\Omega$. Motor ima moment inercije $J_M = 0.05\,\text{kg m}^2$ i preko malog zupčanika momenta inercije $J_{mz} = 0.015\,\text{kgm}^2$ pogoni drugu osovinu s većim zupčanikom ukupnog momenta inercije $J_{b+vz} = J_b + J_{vz} = 1.3\,\text{kg m}^2$. Na drugoj osovini nalazi se bubanj namatača na kojeg se namata žica, koja djeluje silom $F = 1300\,\text{N}$ na bubanj u smjeru prikazanom na slici. Omjer reduktora iznosi $i = 20$. Korisnost zupčanog prijenosa iznosi $\eta_{zp} = 0.8$, a korisnost prijenosa bubanj-žica $\eta_b = 0.95$. Polumjer bubnja iznosi 0.6 m. Ulaz istosmjernog pretvarača spojen je na istosmjerni izvor napona $U = 120\,\text{V}$.



Slika 1: Pogon namatača žice realiziran s istosmjernim motorom

a) **(6 bodova)** Odrediti ukupan moment inercije sustava i moment tereta reduciran na osovinu motora.

b) **(3 boda)** Istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom napaja se iz 4-kvadrantnog čopera. Uz faktor vođenja D=0.75 i bipolarnu modulaciju, odrediti brzinu namatanja žice. U obzir uzeti gubitke trenja i ventilacije.

c) **(2 boda)** Nacrtati valni oblik napona na motoru uz faktor vođenja D=0.8.

2. zadatak (11 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 $M_t = k/n$ Nm. Gubici trenja i ventilacije motora se zanemaruju. Pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji motor je opterećen s 50% nazivnog momenta.

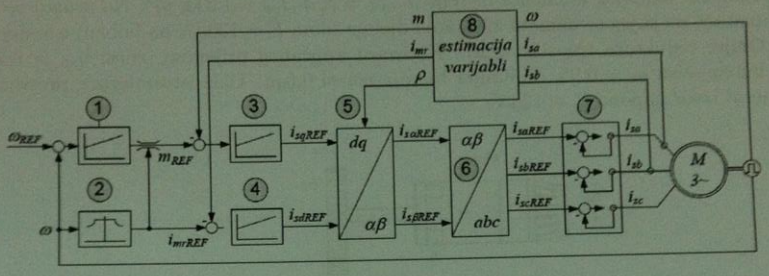
a) **(6 bodova)** Odrediti zadanu (referentnu) frekvenciju uz koju bi brzina vrtnje motora bila $n = 900\,\text{min}^{-1}$. Koliki je moment tereta pri novoj referentnoj frekvenciji? Na istom grafu nacrtati momentne karakteristike motora i tereta, te naznačiti karakteristične točke (prekretni moment i klizanje, sinkronu brzinu i radnu točku).

b) **(1 bod)** Kolika je minimalna dozvoljena referentna frekvencija s kojom opisani pogon može trajno raditi? Obrazloži!

c) **(4 boda)** Nacrtati funkcijsku blok shemu skalarnog upravljanja asinkronog motora u otvorenoj i zatvorenoj petlji.

3. zadatak (8 bodova)

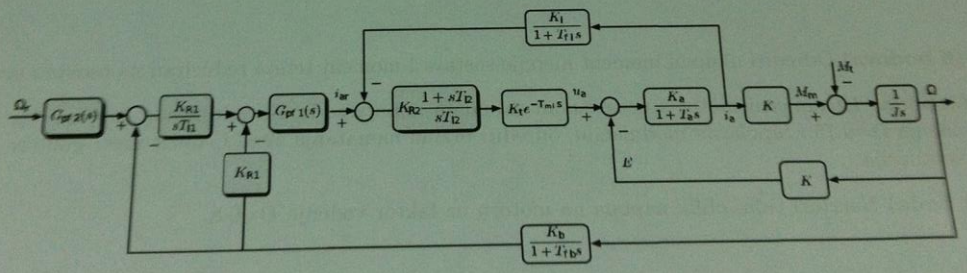
Vektorski upravljan asinkroni motor ima strukturu upravljanja prikazanu na slici 2. Motor se vrti brzinom $n = 1.1\,n_n$ i opterećen je s 30% nazivnog momenta. Kvalitativno skicirati odzive struja $i_{mr}(t)$ i $i_{sq}(t)$, te brzine vrtnje $\omega(t)$ za slučaj da se motoru skokovito smanji referentna vrijednost brzine na $n = 0.9\,n_n$ pri čemu moment tereta ostane nepromijenjen.



Slika 2: Sustav za regulaciju brzine s vektorski upravljanim asinkronim motorom

4. zadatak (15 bodova)

Kaskadna struktura upravljanja brzinom istosmjernog motora prikazana je na slici 3, pri čemu pojedini parametri iznose: $K_a = 4.5\,A/V$, $T_a = 0.025\,\mathrm{s}$, $K = 1.33\,\mathrm{Vs/rad}$, $K_t = 44$, $T_{mi} = 1.66\,\mathrm{ms}$, $K_i = 0.1\,\mathrm{V/A}$, $T_{fi} = 2\,\mathrm{ms}$, $K_b = 0.0318$, $T_{fb} = 15\,\mathrm{ms}$, $J = 2.4\mathrm{kg\ m}^2$.



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

Potrebno je:

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

(3 boda) Ukoliko se promjeni nadomjesno mrtvo vrijeme pratvarača na $T_{mi} = 3ms$, uz param regulatora određene u a) dijelu zadatka, koliko će pri iznositi karakteristični faktor prigušenja ζ

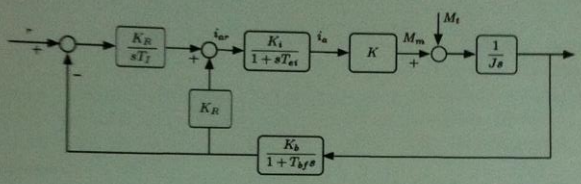
b) **(5 bodova)** Izračunati parametre modificiranog PI regulatora brzine vrtnje motora prema simetri optimumu tako da fazno osiguranje iznosi $\gamma = 45°$. Projektirati prefiltar u referentnoj grani vrtnje $G_{pf2}(s)$.

c) **(3 boda)** Ukoliko zamjenimo mjerni član brzine, mjernim članom koji ima bržu dinamiku $T_{fb} = 0.5ms$, koliko će tada iznositi fazno osiguranje uz parametre regulatora određene u b) dijelu zadatka?

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 4. Pritom su: $K_i = 1, T_{ei} = 5\,\text{ms}$, $K = 1.33\,\text{Vs/rad}$ i $J = 3\,\text{kgm}^2$, $K_{fb} = 1$, $T_{fb} = 1ms$. Potrebno je:



Slika 4: Blokovska shema upravljanja brzinom DC motora s nezavisnom uzbudom

a) **(4 boda)** 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) **(3 boda)** Odrediti prefiltar u grani referentne vrijednosti brzine vrtnje kojim se krate neželjene nule.

d) **(3 boda)** Odrediti prefiltar u grani referentne vrijednosti brzine vrtnje (umjesto prefiltra određenog u c) dijelu zadatka) kojim se osigurava točnost slijeđenja linearno rastuće referentne veličine.

JIR_2015 (1.)

$P_n = 2.2\ kW$ → $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 53.87\ Nm$

$U_n = 120\ V$

$I_n = 22.5\ A$

$n_n = 390\ min^{-1}$

$R_a = 0.7\ \Omega$

$c_e = \frac{U_n - I_n R_a}{\omega_n} = 2.5526$

$M_{em,n} = I_n \cdot c_m = 57.43$

$M_{ter,ven} = M_{em,n} - M_n = 3.57\ Nm$

$J_m = 0.05\ kg\ m^2$

$J_{m2} = 0.015\ kg\ m^2$

$J_{t+v2} = J_t + J_{v2} = 1.3\ kg\ m^2$

$F = 1300\ N$

$i = 20$

$\eta_{zp} = 0.8$

$\eta_t = 0.95$

$R_t = 0.6\ m$

---

a) $P_t = F v = F R_t \omega_t$

$P_t = \eta_{zp} \eta_t P_m = \eta_{zp} \eta_t M_t^* \omega_m$

$\omega_m = i \omega_t$

$\eta_{zp} \eta_t M_t^* \omega_t \cdot i = F R_t \omega_t$

$M_t^* = \frac{F R_t}{\eta_{zp} \eta_t i}$ => $\boxed{M_t^* = 51.32\ Nm}$

→ $\frac{J_{t+v2} \cdot \omega_t^2}{2} = \eta_{zp} \frac{J_{t+v2}^* \omega_m^2}{2}$

$J_{t+v2}^* = \frac{J_{t+v2}}{\eta_{zp} i^2} = 4.0625 \cdot 10^{-3}\ kg\ m^2$

→ $\frac{m v^2}{2} = \eta_{tp}\,\eta_{tr}\,\frac{J_\epsilon^* \omega_m^2}{2}$

$m = \frac{F}{g} \qquad v = R_r \frac{\omega_m}{i}$

$\frac{F}{g} \cdot R_r^2 \frac{\omega_m^2}{i^2} = \eta_{tp}\,\eta_{tr}\, J_\epsilon^*\, \omega_m^2$

$J_\epsilon^* = \frac{F R_r^2}{\eta_{tp}\,\eta_{tr}\, g\, i^2} = 0.156983 \ kg\,m^2$

→ $J = J_M + J_{M2} + J_{tr+v2}^* + J_\epsilon^*$

$\boxed{J = 0.226 \ kg\,m^2}$

---

b) $D = 0.75$

110 V

$D = \frac{U + U_{DC}}{2U_{DC}} \rightarrow U_a = 60\,V$

$v = ?$

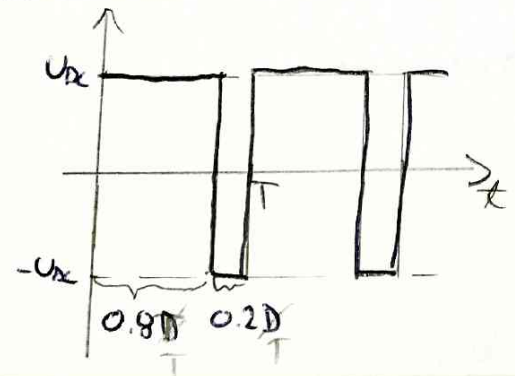
$I_a = \frac{M_x^* + M_{er,ven}}{C_{em}} = 21.5\ A$

$\omega_m = \frac{U_a - I_a R_M}{C_e} = 17.61\ rad/s$

$v = R_r \omega_r = \frac{R_r}{i} \omega_m \rightarrow \boxed{v = 0.528\ m/s}$

---

c) $D = 0.8$



JIR_2015

(2.) $U_m = 400\ V$ → $n_s = 1500\ min^{-1}$

$P_m = 5\ kW$

$n_m = 1480\ min^{-1}$

$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 33.39\ Nm$

$f_m = 50\ Hz$

$\frac{M_{c1}}{M_m} = \frac{n_s - n_1}{n_s - n_m}$ → $n_1 = 1465\ min^{-1}$

$M_{PR} = 3 M_m$

$M_c = \frac{k}{n}$

$k = M_{c1} \cdot n_1 = 24457.55$

$M_{c1} = 0.5 M_m$

---

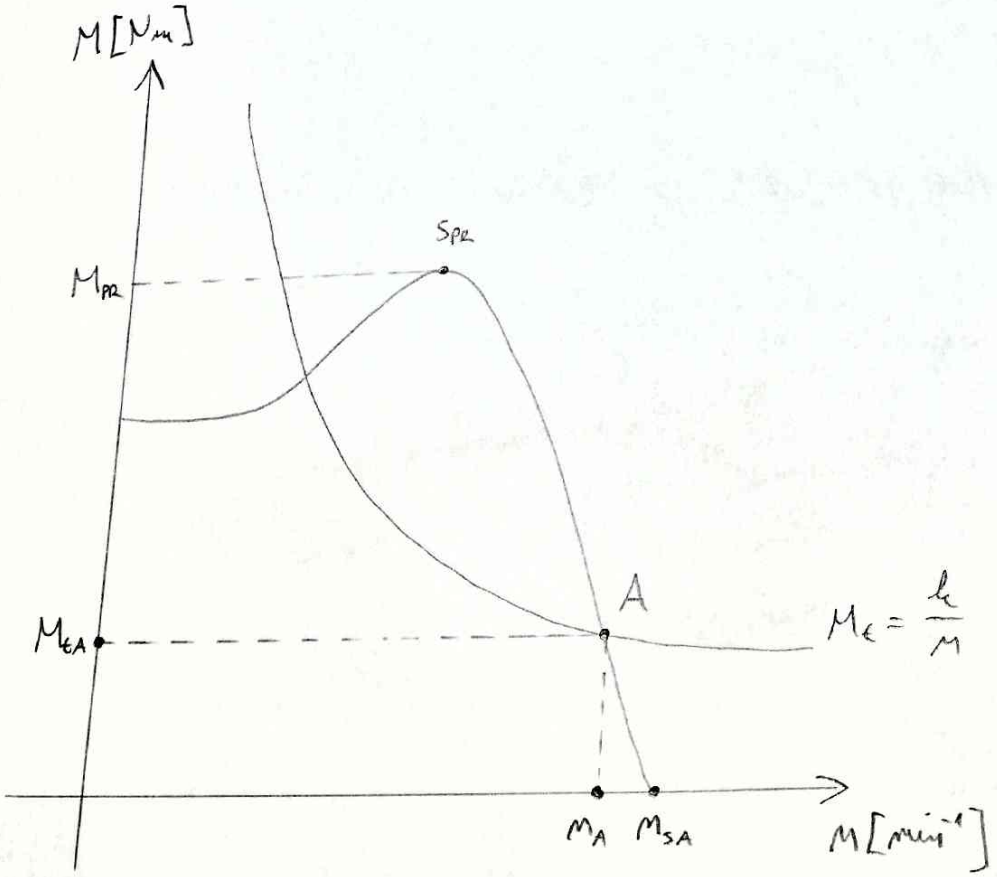
a) $n_A = 900\ min^{-1}$

$M_{cA} = \frac{k}{n_A}$ → $M_{cA} = 27.18\ Nm$

$\frac{M_{cA}}{M_{c1}} = \frac{n_{sA} - n_A}{n_{sm} - n_1}$ → $n_A = 956.97$

$n_A = 30 f_A$

$f_A = 31.9\ Hz$



b) $f_B = ?$ → MIN. DOZVOLJENA FREKVENCIJA

$M_{eB} = M_M$ → $M_{eB} = \frac{k}{n_B}$ → $n_B = 732.5\ min^{-1}$

$\frac{M_{eB}}{M_{e1}} = \frac{n_{sB} - n_B}{n_{sn} - n_1}$ → $n_{sB} = 802.5\ min^{-1}$

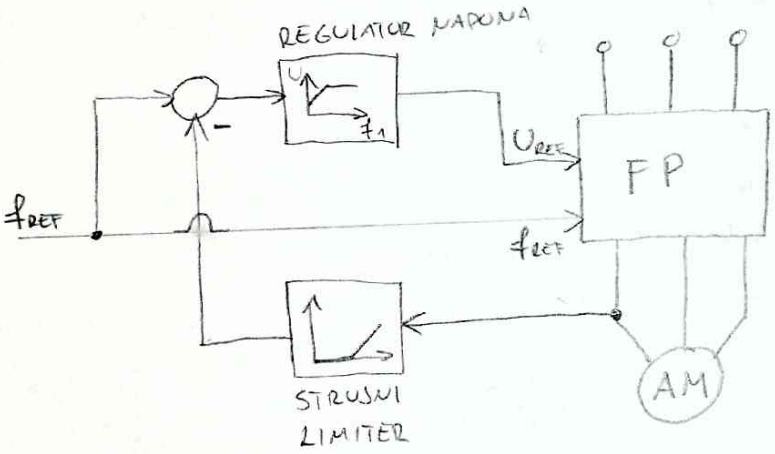
$30 f_B = n_{sB}$

$f_B = 26.75\ Hz$

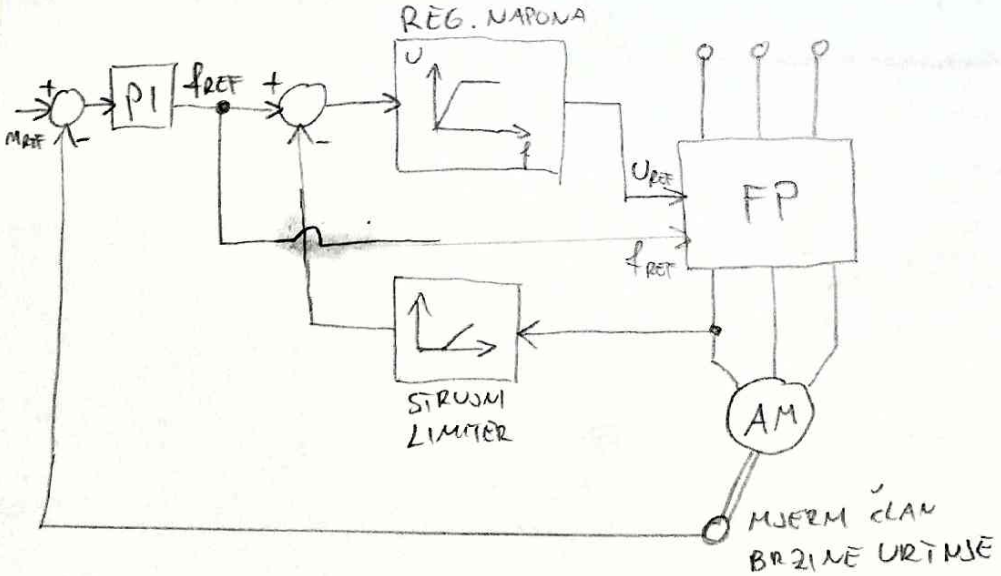
POGON MOŽE TRAJNO RADITI ZA OPTEREĆENJE NAZIVNIM MOMENTOM NA FREKV. f_B.

---

c) SHEMA SKALARNOG UPR. AS U OTVORENOJ PETLJI:



SHEMA SKALARNOG UPR. AS U ZATVORENOJ PETLJI:



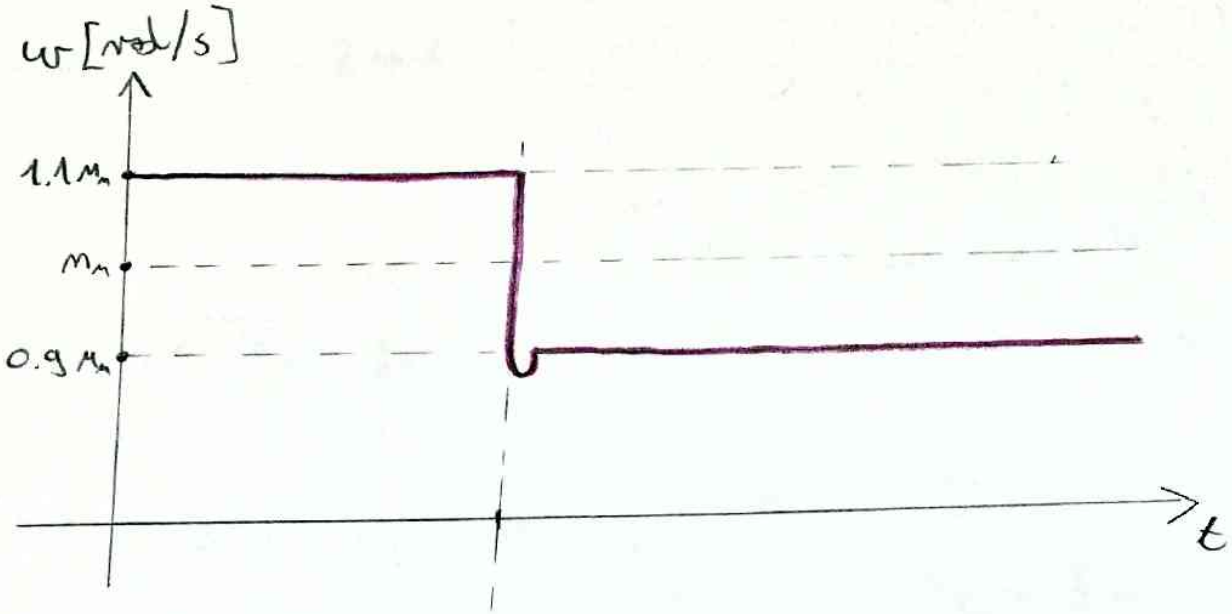
3.

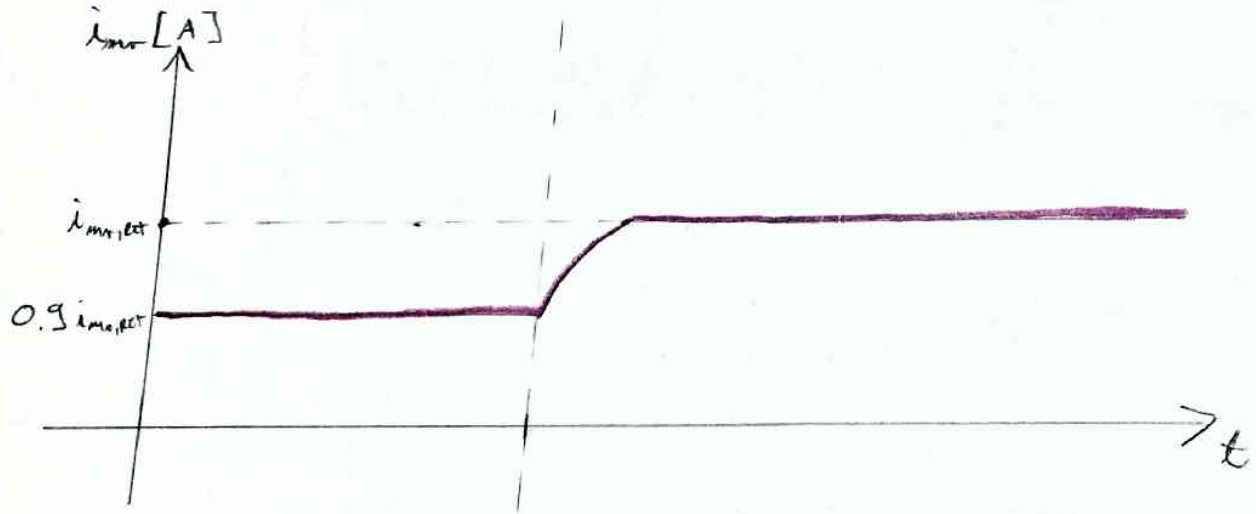
$M = 1.1\, M_m$

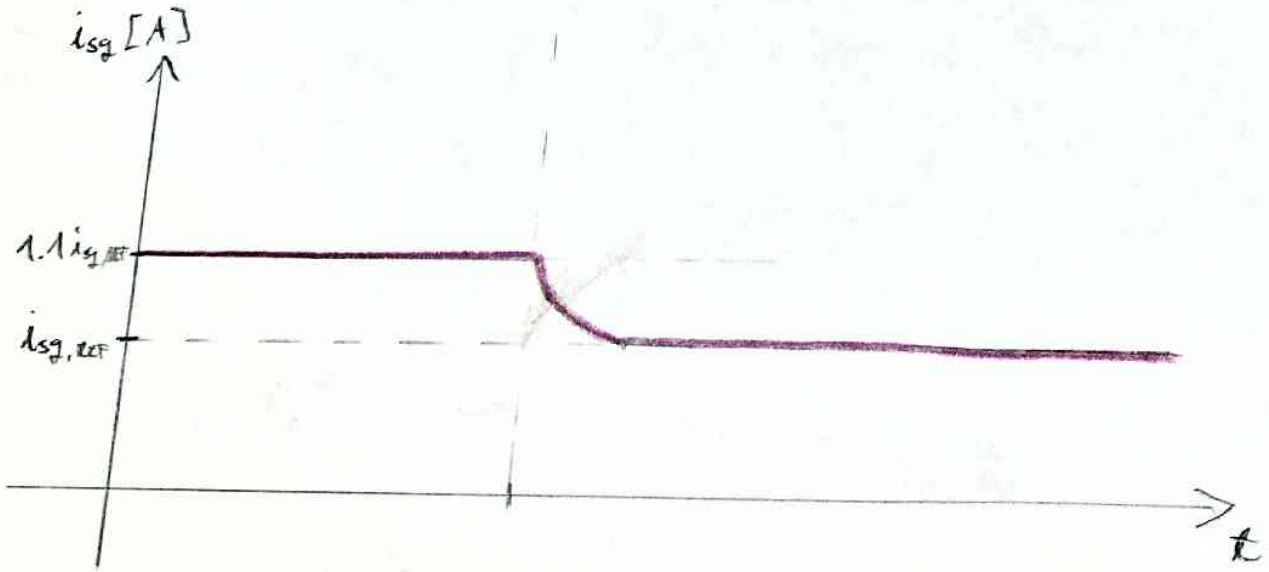
$M_\ell = 0.3\, M_m$

$M^* = 0.9\, M_m$

$M_\ell^* = M_\ell$







JIR_2015 (4)

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

$K = 1.33\ Vs/rad$, $J = 2.4\ kg\,m^2$

$K_t = 44$, $T_{mi} = 1.66\ ms$

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

$K_\theta = 0.0318$, $T_{f\theta} = 15\ ms$

---

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

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

$$T_{\Sigma 1} = T_{mi} + T_{fi} = 3.66\ ms$$

$$T_{I1} = T_a \rightarrow \boxed{T_{I1} = 25\ ms}$$

$$K_{R1} = \frac{1}{2K_{s1}} \frac{T_{I1}}{T_{\Sigma 1}} \rightarrow \boxed{K_{R1} = 0.1725}$$

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

---

b) $T_{mi}^* = 3\ ms \rightarrow T_{\Sigma}^* = T_{mi}^* + T_{fi} = 5\ ms$

$$G_{f1}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma 1}T_{\Sigma 1}^* s^2 + 2T_{\Sigma 1}s + 1}$$

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

$$\rightarrow \frac{2\zeta}{\omega_n} = 2T_{\Sigma 1} \rightarrow \zeta = \sqrt{\frac{T_{\Sigma 1}}{2T_{\Sigma 1}^*}}$$

$$\boxed{\zeta = 0.605}$$

b) $\gamma = 45° \rightarrow a = 1+\sqrt{2}$

$$G_{r_1}(s) = \frac{1}{2\tilde{T}_{\Sigma_1}^2 s^2 + 2\tilde{T}_{\Sigma_1} s + 1} \approx \frac{1}{1 + 2\tilde{T}_{\Sigma_1} s}$$

$$G_{p_2}(s) = \frac{K K_a}{Js(1+2\tilde{T}_{\Sigma_1} s)(1+T_{fb} s)}$$

$$G_{s_2}(s) = \frac{K_{s_2}}{T_M s(1+\tilde{T}_{\Sigma_2} s)} \rightarrow \frac{K_{s_2}}{T_M} = \frac{K K_a}{J} = 0.0176$$

$\tilde{T}_{\Sigma_2} = 2\tilde{T}_{\Sigma_1} + T_{fb} = 22.32\ ms$

$\tilde{T}_{I_2} = a^2 \tilde{T}_{\Sigma_2} \Rightarrow \boxed{\tilde{T}_{I_2} = 130.09\ ms}$

$K_{R_2} = \frac{1}{a K_{s_2}} \frac{T_M}{\tilde{T}_{\Sigma_2}} \Rightarrow \boxed{K_{R_2} = 1053.083}$

$$\boxed{G_{PI_2}(s) = \frac{K_R}{1+T_{fb} s}} \cdot \frac{1+\tilde{T}_{I_2} s}{1}$$

---

c) $T_{fb}^* = 0.5\ ms \rightarrow \tilde{T}_{\Sigma_2}^* = 2\tilde{T}_{\Sigma_1} + T_{fb}^* = 7.82\ ms$

$$G_{o_2}(s) = \frac{K_{R_2} K_{s_2}(1+\tilde{T}_{I_2} s)}{\tilde{T}_{I_2} T_M s^2 (1+\tilde{T}_{\Sigma_2}^* s)}$$

$\rightarrow |G_{o_2}(j\omega_c^*)| = 1 \rightarrow \boxed{\omega_c^* = 9.46\ rad/s}$

$\rightarrow \gamma = arctg(\tilde{T}_{I_2} \omega_c^*) - arctg(\tilde{T}_{\Sigma_2}^* \omega_c^*)$

$\boxed{\gamma = 46.68°}$

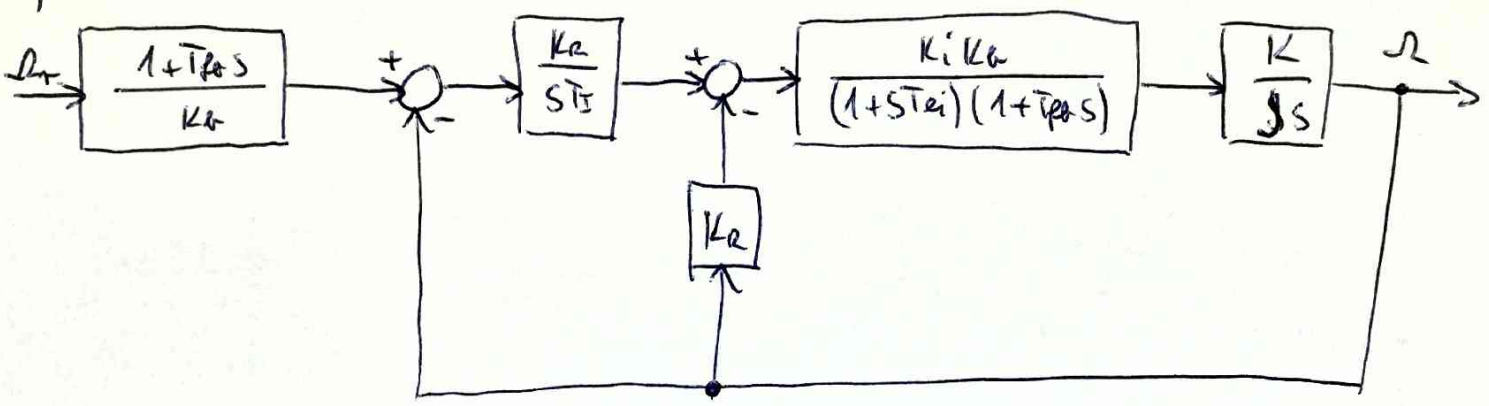
(5) $K_i = 1$, $T_{ei} = 5\,ms$

$K = 1{,}33\ Vs/rad$, $J = 3\ kg\,m^2$

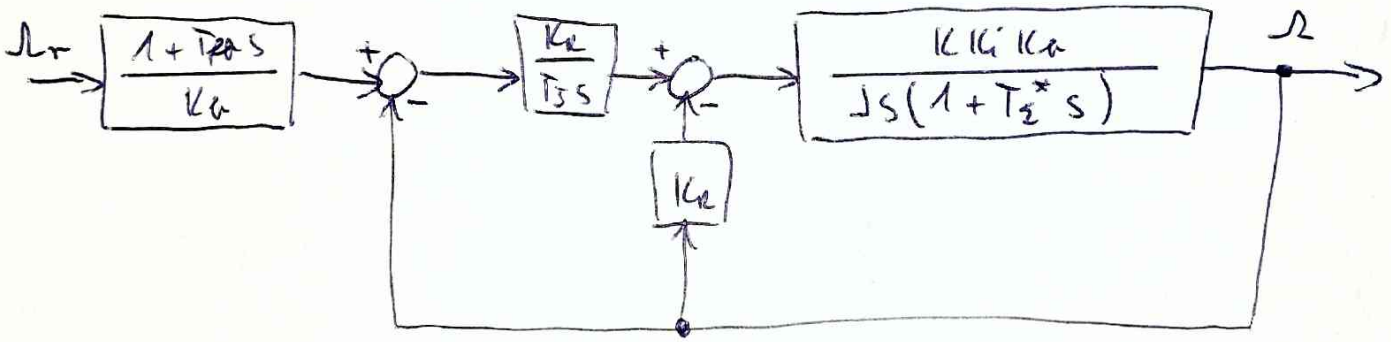
$K_\omega = 1$, $T_{p\omega} = 1\,ms$

---

a)



→ NEDOMINANTNE VREM. KONSTANTE T_{ei} I $T_{p\omega}$ MOGU SE NADOMJESTITI S $T_\Sigma^* = T_{ei} + T_{p\omega}$



$$G_r(s) = \frac{\Omega(s)}{\Omega_r(s)} = \frac{1+T_{p\omega}s}{K_\omega} \cdot \frac{1}{\frac{JT_\Sigma^* T_I}{K K_i K_R K_\omega} s^3 + \frac{JT_I}{K K_i K_R K_\omega} s^2 + T_I s + 1}$$

b) $T_e = 0.1\,s$

$D_2 = 0.5$

$\rightarrow a_1 = T_I \qquad a_2 = \frac{J T_I}{K K_i K_a K_R} \qquad a_3 = \frac{J T_e^* T_I}{K K_i K_a K_R}$

$\rightarrow a_1 = T_e \rightarrow \boxed{T_I = 0.1\,s}$

$\rightarrow a_2 = D_2 T_e^2 \rightarrow K_a = \frac{J}{D_2 T_e K K_i K_a} \Rightarrow \boxed{K_a = 45.1128}$

---

c) $\boxed{G_{PP}(s) = \frac{1}{1 + T_{pp} s}}$

---

d) $\boxed{G_{PP}(s) = \frac{K_a (1 + T_I s)}{1 + T_{pp} s}}$