

Pismeni ispit

20. veljače 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.

- (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.
- (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.
- (4 bodova) Ako na motor priključimo teret momentne karakteristike $M_t = k n^2 \text{ Nm}$, pri nazivnom naponu 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 $M_t = k/n \text{ Nm}$. Pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji motor se vrti brzinom $n = 1480 \text{ min}^{-1}$. Gubici trenja i ventilacije motora se zanemaruju.

- (5 bodova) Odrediti zadanu (referentnu) frekvenciju uz koju bi brzina vrtnje motora bila $n = 800 \text{ min}^{-1}$ uz zadani teret. Koliki je moment tereta pri novoj referentnoj frekvenciji? Nacrtati momentne karakteristike motora i tereta, te naznačiti karakteristične točke.
- (4 boda) Odrediti zadanu (referentnu) frekvenciju uz koju bi motor bio opterećen s nazivnim momentom uz zadani teret. Nacrtati momentne karakteristike motora i tereta, te naznačiti karakteristične točke.
- (5 bodova) Odrediti moment tereta u slučaju da je motor upravljan U/f metodom u zatvorenoj petlji uz zadanu referentnu vrijednost brzine $n_{ref} = 1000 \text{ min}^{-1}$, a mjerni član brzine griješi 10% stvarne vrijednosti brzine u cijelom mjernom opsegu (npr. ako je stvarna brzina 100 min^{-1} , mjerni član daje 90 min^{-1}). Kolika je frekvencija (osnovnog harmonika) napona napajanja?

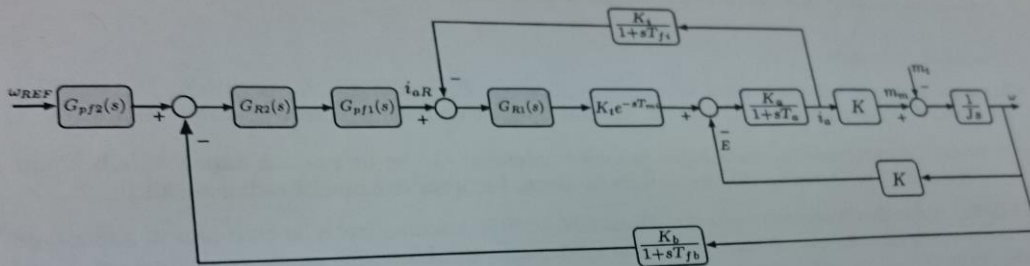
3. zadatak (11 bodova)

Vektorski upravljani asinkroni motor opterećen momentom nepoznatog iznosa se napaja frekvencijom $f = 40 \text{ Hz}$ i vrti konstantnom brzinom vrtnje $n = 970 \text{ min}^{-1}$. U trenutku $t = 0,02 \text{ s}$ estimirani položaj vektora toka rotora iznosi $\rho = 75^\circ$, a struje $i_{sd} = 25,2 \text{ A}$ i $i_{sq} = 12,1 \text{ A}$.

- (4 boda)** Odredite vrijednosti faznih struja statora te α i β komponenti struje statora u trenutku $t = 0,025$ s. Koliku je struja motora?
- (3 boda)** Nacrtati troosni abc , dvoosne $\alpha\beta$ i dq koordinantne sustave te označiti komponente rezultantne struje u pojedinim sustavima.
- (2 boda)** Kolike bi bile struje i_{sd} i i_{sq} kada bi stroj bio neopterećen?
- (2 boda)** Skicirati vremenski odziv struja i_{sd} i i_{sq} u slučaju da se u trenutku $t = 0,5$ s asinkronom motoru zada referentna vrijednost brzine $n_{ref} = 1,2n_n$ uz nepromijenjen moment tereta.

... (10 bodova)

Kaskadna struktura upravljanja brzinom istosmjernog motora prikazana je na slici 1, pri čemu pojedini parametri iznose: $K_a = 4,5 \text{ A/V}$, $T_a = 0,025 \text{ s}$, $K = 1,33 \text{ Vs/rad}$, $K_t = 44$, $T_{mi} = 1,66 \text{ ms}$, $K_i = 0,1$, $T_{fi} = 2 \text{ ms}$, $K_b = 0,0318$, $T_{fb} = 15 \text{ ms}$, $J = 2,4 \text{ kgm}^2$.



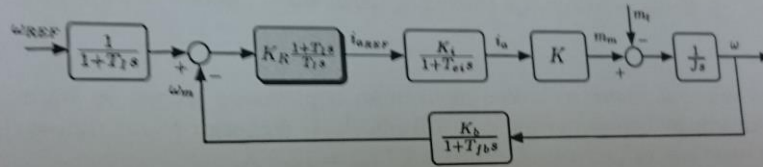
Slika 1: Blokovska shema kaskadnog upravljanja brzinom DC motora s nezavisnom uzбудom

Potrebno je:

- Potrebno je:
- (4 boda)** Projektirati PI regulator struje armature $G_{R1}(s)$ prema tehničkom optimumu kao i prefilter referentne vrijednosti struje armature $G_{pf1}(s)$.
 - (4 boda)** Ukoliko se promjeni nadomjesno mrtvo vrijeme pratvarača na $T_{mi} = 3$ ms, uz parametre regulatora određene u a) dijelu zadatka, koliko će pri iznositi karakteristični faktor prigušenja ζ ?
 - (4 boda)** Skicirati Bodeov dijagram *otvorenog* kruga za sustav podešen po tehničkom optimumu te odrediti fazno osiguranje.
 - (4 boda)** Pretpostavimo da je brzina vrtnje regulirana klasičnim PI regulatorom $G_{R2} = K_R \frac{1+T_{i2}s}{T_{i2}s}$ 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 većim nadvišanjem $K_R = 5K_R^*$ ili $K_R = 0,1K_R^*$. Skicirati Bodeov dijagram za oba slučaja.

5. 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 $J = 3 \text{ kgm}^2$, $K_b = 0,5$, $T_{fb} = 1 \text{ ms}$. Potrebno je:



Slika 2: Blokovska shema upravljanja brzinom DC motora s nezavisnom uzбудom

- (4 boda) Odrediti prijenosnu funkciju zatvorenog kruga.
- (4 boda) Odrediti parametre PI regulatora brzine vrtnje tako da dominantni karakteristični odnosi u karakterističnom polinomu zatvorenog kruga bude postavljeni prema optimumu dvostrukog odnosa na $D_i = 0,5$.
- (4 boda) Odrediti parametre PI regulatora brzine vrtnje tako da nadomjesna vremenska konstanta zatvorenog kruga iznosi $T_c = 0,1 \text{ s}$, a karakteristični odnos $D_2 = 0,5$.
- (4 boda) Odrediti pogrešku slijeđenja u slučaju referentne veličine oblika skokovite pobude.

$$\textcircled{1} P_m = 2.2 \text{ kW}$$

$$I_m = 22.5 \text{ A}$$

$$U_m = 120 \text{ V}$$

$$n_m = 390 \text{ min}^{-1}$$

$$R_a = 0.7 \Omega$$

$$\rightarrow c_e = \frac{U_m - I_m R_a}{\omega_m} = c_m = 2.5526$$

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 53.87 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{em}, m} = c_m I_m = 57.43 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{er}, \text{ven}} = M_{\text{em}, m} - M_m = 3.57 \text{ Nm}$$

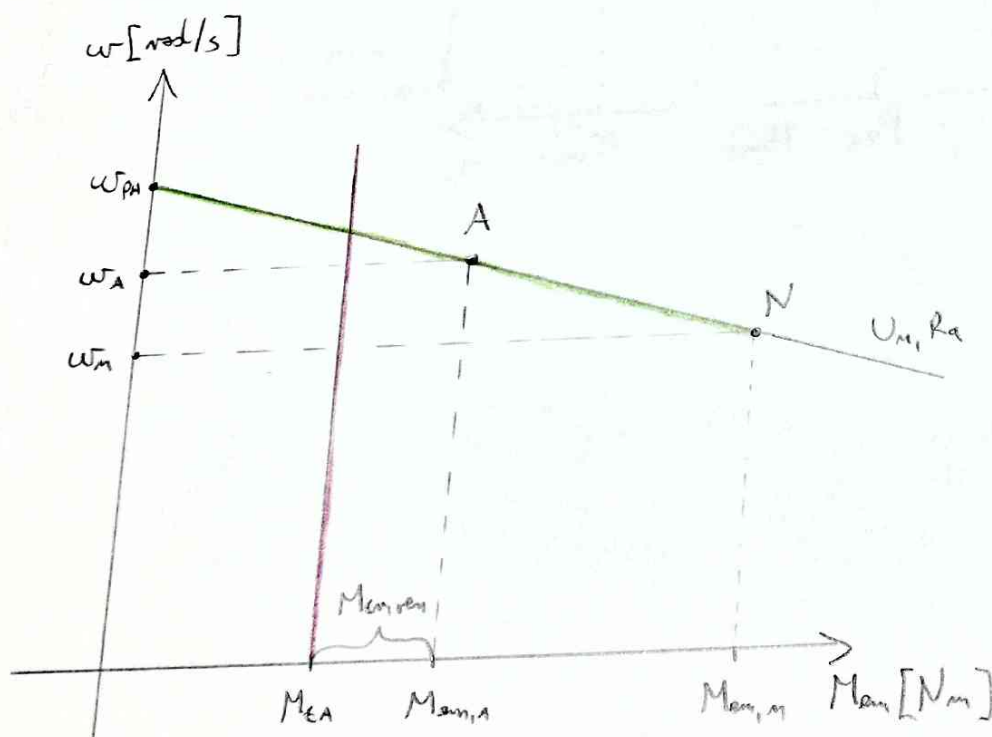
$$\text{a) } U_a = U_m$$

$$n_A = 440 \text{ min}^{-1}$$

$$\rightarrow I_a = \frac{U_m - c_e \omega_A}{R_a} = 3.41 \text{ A}$$

$$M_{\text{em}, A} = M_{EA} + M_{\text{er}, \text{ven}} = c_m I_a$$

$$M_{EA} = 5.13 \text{ Nm}$$



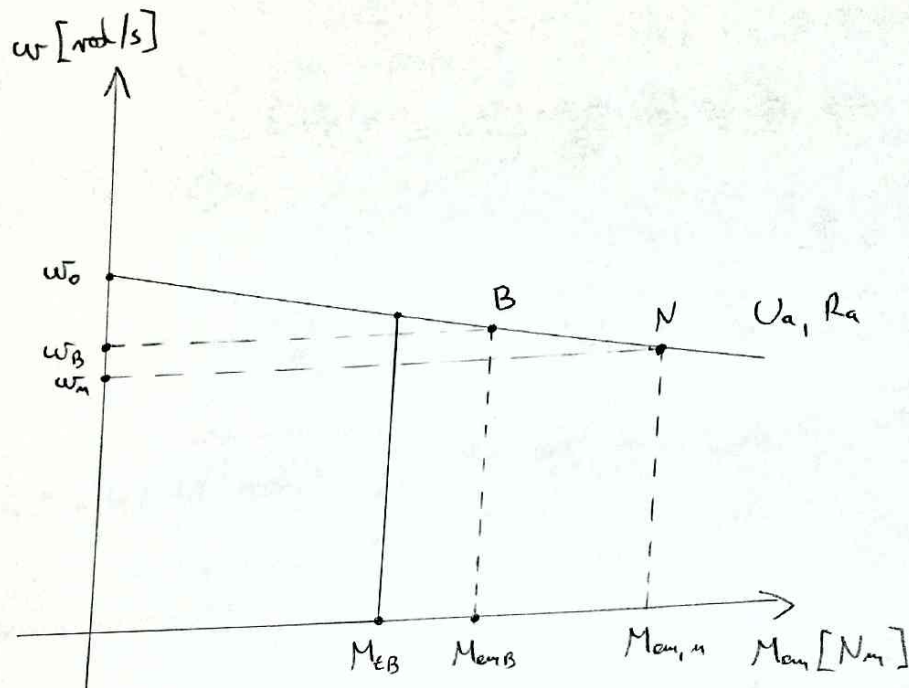
$$b) M_{EB} = 40 \text{ Nm}$$

$$n_B = 200 \text{ min}^{-1}$$

$$\Rightarrow I_a = \frac{M_{EB} + M_{rev}}{c_m} = 17.07 \text{ A}$$

$$U_a = c_e \omega_B + I_a R_a$$

$$U_a = 65.41 \text{ V}$$



$$c) M_e = 1 \text{ Nm}^2$$

$$I_a = 20 \text{ A}$$

$$U_a = U_n$$

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

$$k \cdot \left(\frac{30}{\pi} \omega_c \right)^2 = C_m I_a - M_{er,ven}$$

$$\omega_c = \frac{U_n - R_a I_a}{C_e} = 41.53 \text{ rad/s}$$

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

$$\phi^* = 0.98 \phi_n \rightarrow C_e^* = C_m^* = 0.98 C_e = 2.5015$$

$$I_a^* = \frac{U_n - C_e^* \omega_c^*}{R_a}, \quad I_a^* = \frac{k \cdot \left(\frac{30}{\pi} \omega_c^* \right)^2 + M_{er,ven}}{C_m^*}$$

$$\frac{900}{\pi^2} \frac{k}{C_m^*} \omega_c^{*2} + \frac{C_e^*}{R_a} \omega_c^* + \frac{M_{er,ven}}{C_m^*} - \frac{U_n}{R_a} = 0$$

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

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

$$n_{c1}^* = 402.11 \text{ min}^{-1}$$

② $U_m = 400 \text{ V}$

$P_m = 5 \text{ kW}$

$M_m = 1430 \text{ min}^{-1}$

$f_m = 50 \text{ Hz}$

$M_{pr} = 3 M_m$

$M_e = \frac{h}{m}$

$m_1 = 1480 \text{ min}^{-1}$

$\Rightarrow m_{sm} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (p=2)$

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

$\frac{M_{e1}}{M_m} = \frac{m_{sm} - m_1}{m_{sm} - m_m} \Rightarrow M_{e1} = 9.54 \text{ Nm}$

$M_{e1} = \frac{h}{m_1} \Rightarrow h = 14118.84$

a) $M_A = 800 \text{ min}^{-1}$

$M_{eA} = \frac{h}{M_A}$

\rightarrow

$M_{eA} = 17.65 \text{ Nm}$

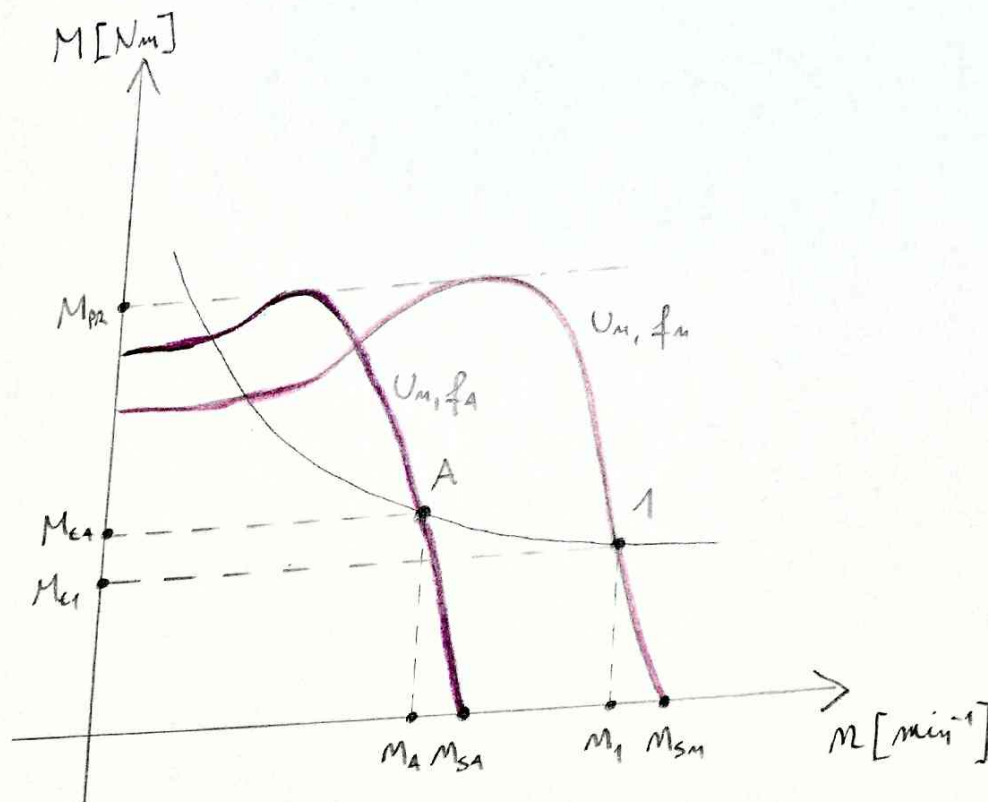
$\frac{M_{eA}}{M_{e1}} = \frac{m_{SA} - M_A}{m_{sm} - m_1} \Rightarrow m_{SA} = \frac{M_{eA}}{M_{e1}} (m_{sm} - m_1) + M_A$

$m_{SA} = 837 \text{ min}^{-1}$

$m_{SA} = \frac{60 f_A}{p}$

\rightarrow

$f_A = 27.9 \text{ Hz}$



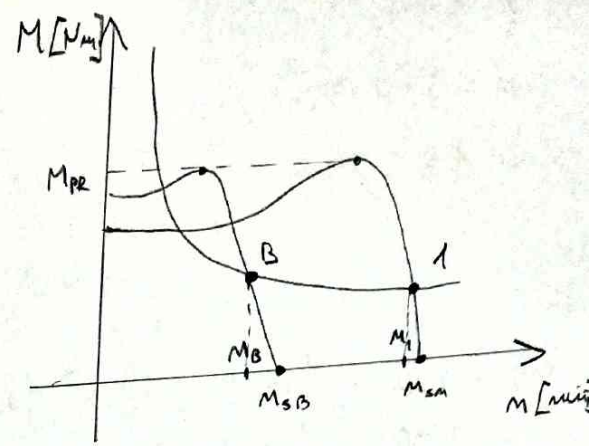
$$b) M_{EB} = M_m \rightarrow M_{EB} = \frac{l}{m_B}$$

$$m_B = 422.86 \text{ min}^{-1}$$

$$\frac{M_{EB}}{M_{E1}} = \frac{m_{SB} - m_B}{m_{SM} - m_1} \rightarrow m_{SB} = 492.86 \text{ min}$$

$$m_{SB} = \frac{60 f_B}{p}$$

$$f_B = 16.43 \text{ Hz}$$



$$c) M_{REF} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$0.9 M_c = M_{REF} \rightarrow m_c = 1111.11 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{EC} = \frac{l}{m_c} \rightarrow M_{EC} = 12.71 \text{ Nm}$$

$$\frac{M_{EC}}{M_{E1}} = \frac{m_{SC} - m_c}{m_{SM} - m_1} \rightarrow m_{SC} = 1137.75 \text{ min}^{-1}$$

$$m_{SC} = \frac{60 f_c}{p}$$

$$f_c = 37.93 \text{ Hz}$$

③ $f = 40 \text{ Hz}$

$n = 970 \text{ min}^{-1}$

$\omega t = 20 \text{ ms} : \varphi = 75^\circ = \frac{5}{12} \pi$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.2 \\ 12.1 \end{bmatrix} \rightarrow I_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} = 27.95 \text{ A}$$

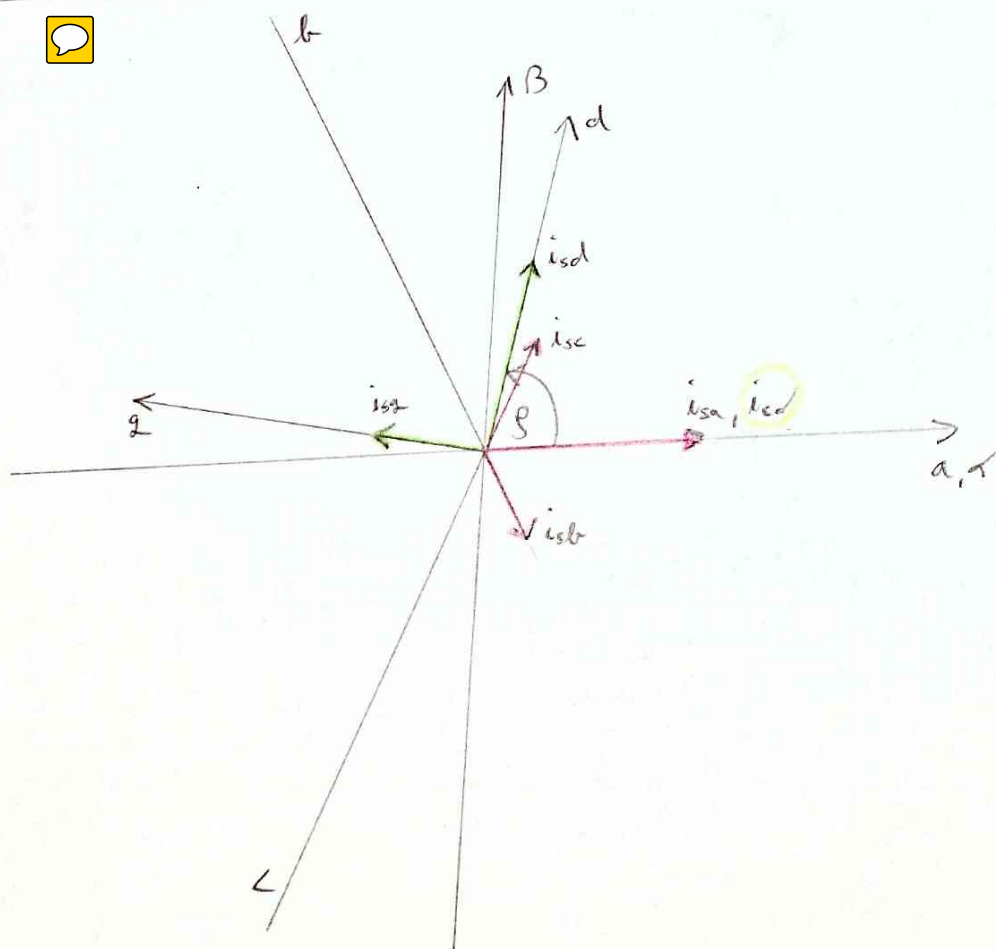
a) $t = 25 \text{ ms}$

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega t + \varphi) = \frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{4} I_m \\ i_b &= I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m \\ i_c &= I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi) = -\frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{4} I_m \end{aligned} \right\} i_a + i_b + i_c = 0 \quad \checkmark$$

$$\begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.24 \\ 27 \end{bmatrix}$$

$I_n = 19.76 \text{ A}$

b)

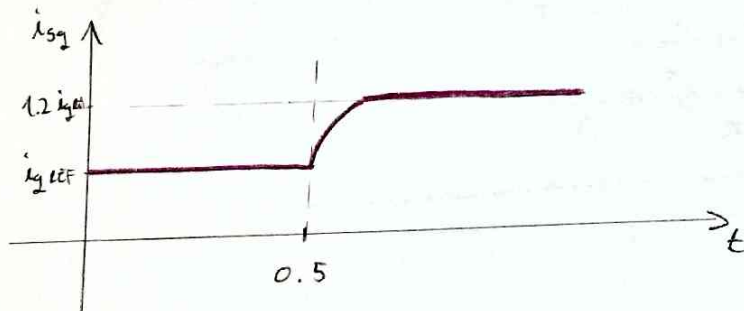
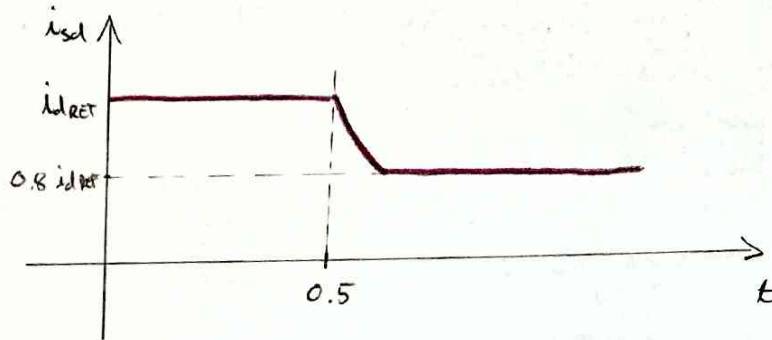


c) $M_e^* = 0$

$i_{sd}^* = 7.24 \text{ A}$ ($\phi = \text{const}$)

$i_{sq}^* = 0 \text{ A}$

d) u $t = 0.5 \text{ s}$ $M^* = 1.2 M_n$



ZIR_2018_4.mol

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

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

$$K_t = 44 \quad T_{mi} = 1.66 \text{ ms}$$

$$K_i = 0.1 \quad T_{pi} = 2 \text{ ms}$$

$$K_b = 0.0318 \quad T_{pb} = 15 \text{ ms}$$

a) TEHNIČKI OPTIMUM:

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

$$G_{SI}(s) = \frac{K_{SI}}{(1 + T_{I1} s)(1 + T_{z1} s)}$$

$$\rightarrow K_{SI} = K_t K_a K_i = 19.8 \text{ A/V}$$

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

$$T_{z1} = T_{mi} + T_{pi} = 3.66 \text{ ms}$$

$$K_{R1} = \frac{1}{2 K_{SI}} \frac{T_{I1}}{T_{z1}} \rightarrow$$

$$K_{R1} = 0.1725$$

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

$$G_{PI}(s) = \frac{1}{1 + T_{pb} s}$$

$$b) T_{mi}^* = 3 \text{ ms} \rightarrow T_{z1}^* = T_{mi}^* + T_{pi} = 5 \text{ ms}$$

$$G_T(s) = K_b \frac{1}{\frac{T_{z1}^* T_{I1}}{K_{R1} K_{SI}} s^2 + \frac{T_{I1}}{K_{R1} K_{SI}} s + 1} \rightarrow K_{R1} K_{SI} = \frac{T_{I1}}{2 T_{z1}}$$

$$G_T(s) = K_b \frac{1}{2 T_{z1}^* T_{z1} s^2 + 2 T_{z1} s + 1}$$

$$\rightarrow \frac{1}{\omega_n^2} = 2 T_{z1}^* T_{z1} \rightarrow \omega_n = \frac{1}{\sqrt{2 T_{z1}^* T_{z1}}}$$

$$\rightarrow 2 \frac{\zeta}{\omega_n} = 2 T_{z1} \rightarrow \zeta = \omega_n T_{z1} = \frac{T_{z1}}{\sqrt{2 T_{z1}^* T_{z1}}} = \sqrt{\frac{T_{z1}}{2 T_{z1}^*}}$$

$$\zeta = 0.605$$

$$c) \quad G_0(s) = \frac{K_{e1} K_{s1}}{T_{I1} s (1 + T_{z1} s)} = \frac{136.22}{s \left(1 + \frac{s}{273.22} \right)}$$

$$\rightarrow \text{ampl. wozel: } |G_0(j\omega_c)| = 1$$

$$\frac{K_{e1} K_{s1}}{|T_{I1} j\omega_c (1 + T_{z1} j\omega_c)|} = 1$$

$$K_{e1} K_{s1} = T_{I1} \omega_c \sqrt{1 + T_{z1}^2 \omega_c^2} \quad /^2$$

$$(K_{e1} K_{s1})^2 = T_{I1}^2 \omega_c^2 + T_{I1}^2 T_{z1}^2 \omega_c^4$$

$$T_{I1}^2 T_{z1}^2 \omega_c^4 + T_{I1}^2 \omega_c^2 - K_{e1}^2 K_{s1}^2 = 0$$

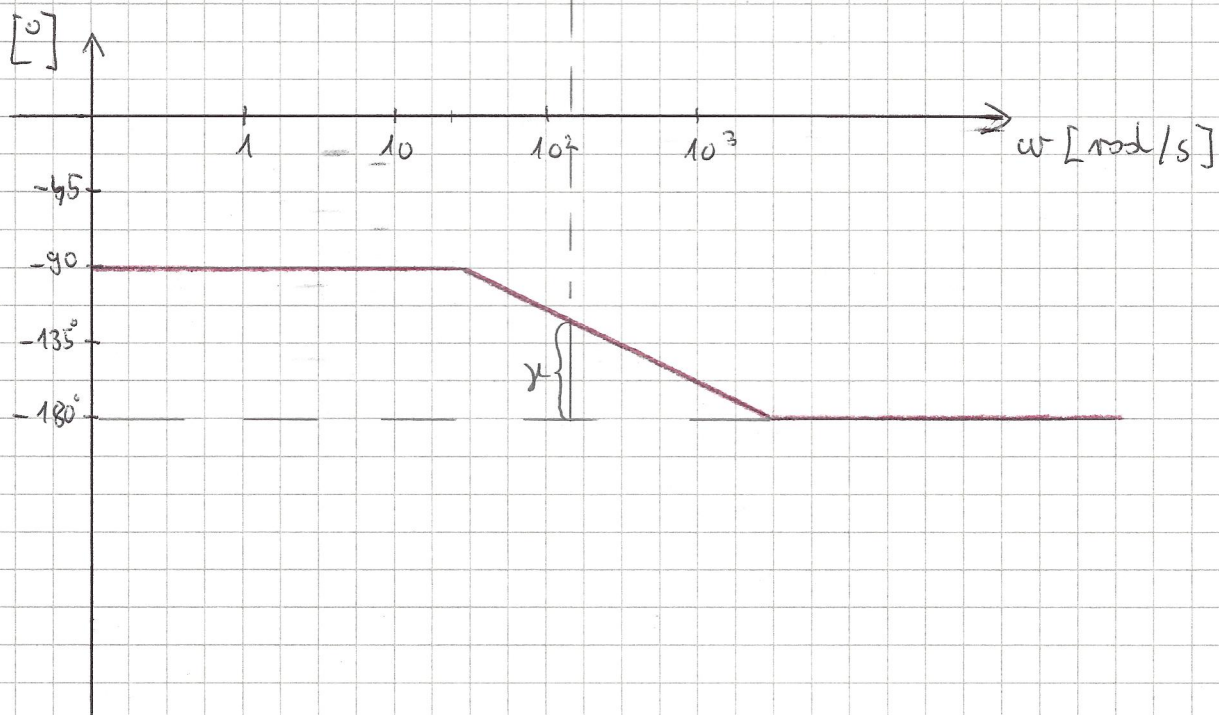
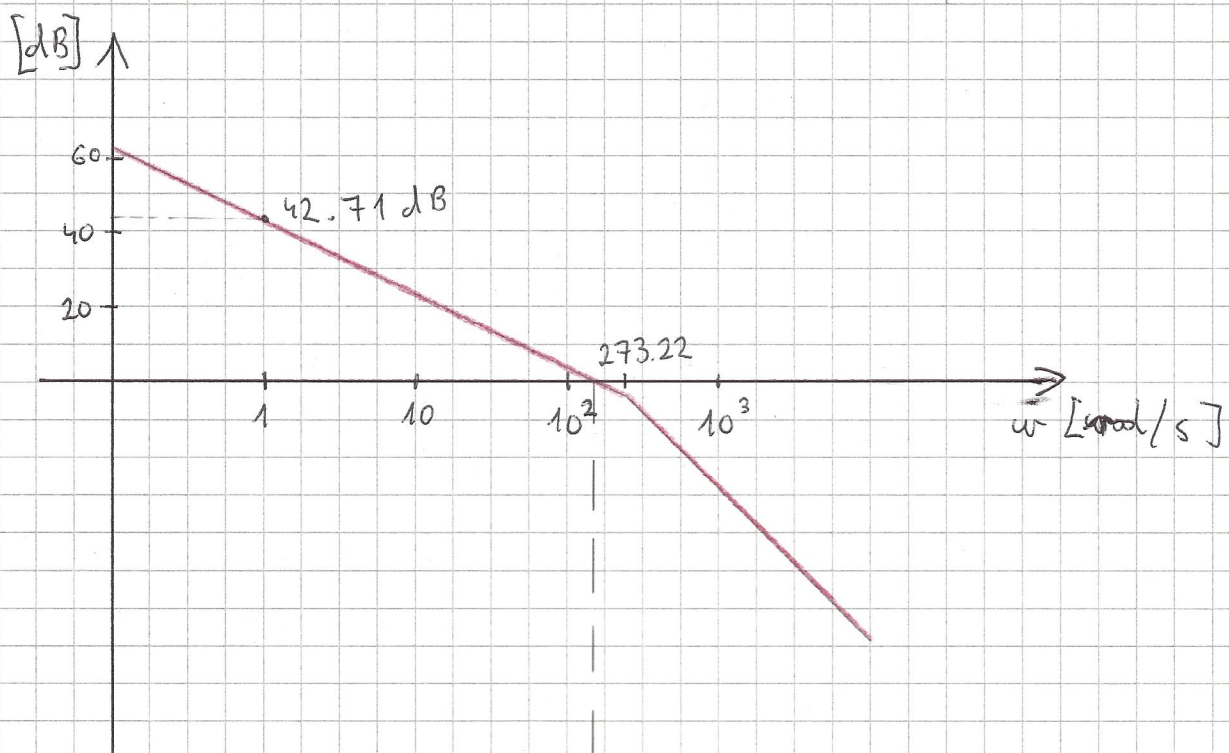
$$\rightarrow \omega_c = 124.35 \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow \gamma = 180^\circ + \arg[G_0(j\omega_c)]$$

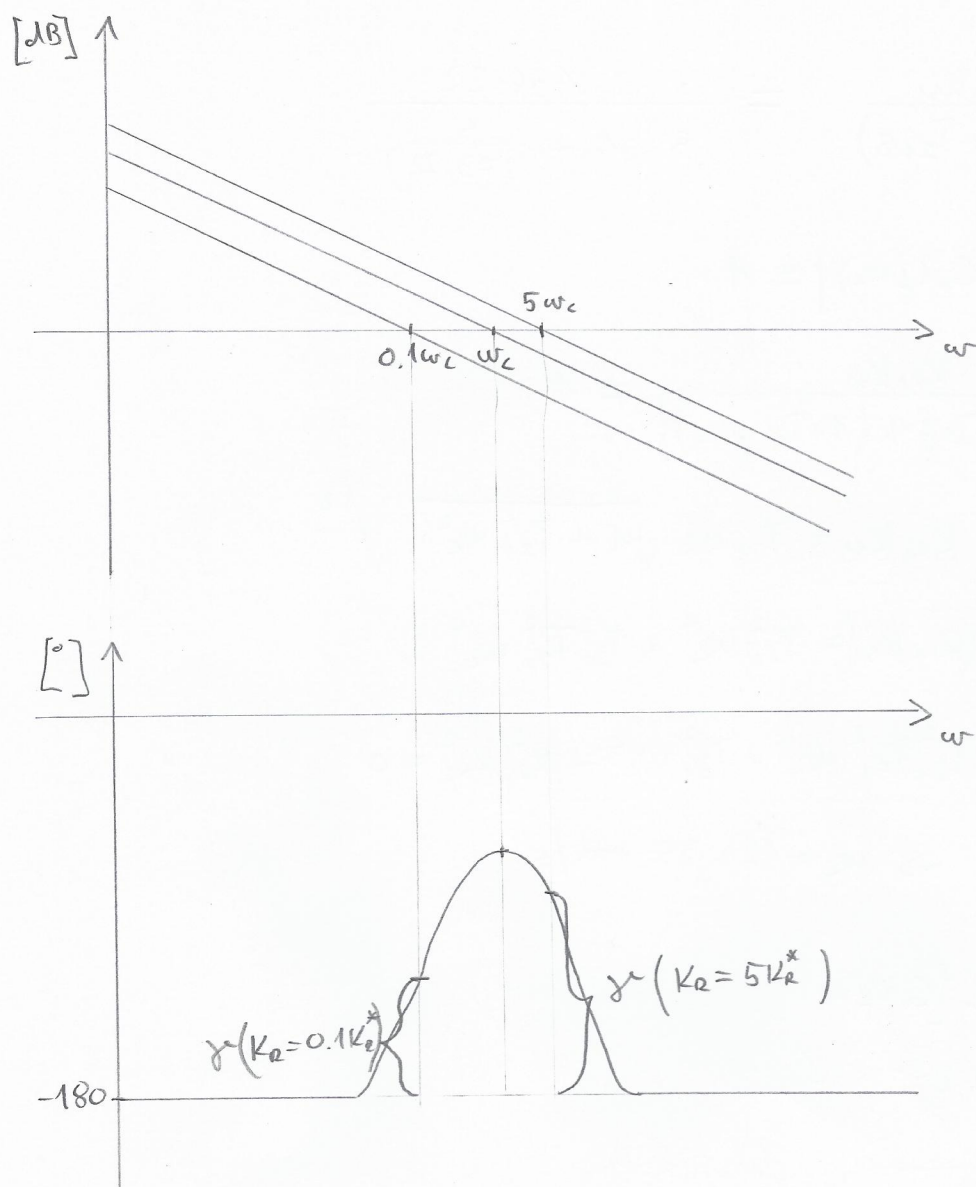
$$= 180^\circ - 114.47^\circ$$

$$\rightarrow \boxed{\gamma = 65.53^\circ}$$

$$A_{dB} = 20 \log(136.22) \rightarrow A_{dB} = 42.71 \text{ dB}$$



d)



→ MIJENJANJEM POJAČANJA k_R MIJENJA SE SAMO AMPLITUDNA KARAKTERISTIKA, A TO ZNAČI DA SE MIJENJA PRESJEČNA FREKVENCIJA ω_c

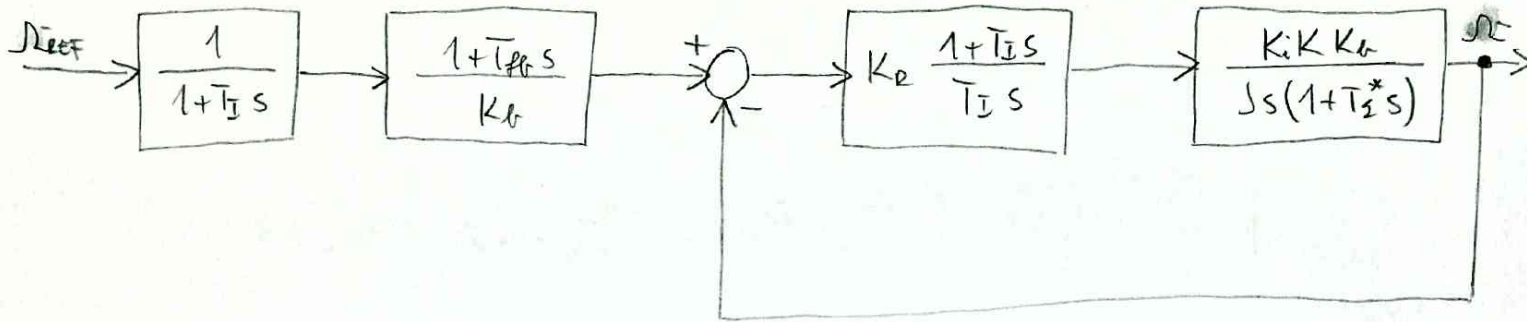
→ IZ BODEOVOG DIJAGRAMA SE VIDI DA JE FAZNO OSIGURANJE MANJE ZA $k_R = 0.1 k_R^*$, A ZBOG $\gamma_m = 70^\circ$ - π SLIJEDI DA TO POJAČANJE REZULTIRA VEĆIM NADVIŠENJEM

21R-2018

⑤. $K_i = 1, T_{ei} = 5 \text{ ms}$

$K = 1.33 \text{ Vs/rool}, J = 3 \text{ kg m}^2 \Rightarrow T_s^* = T_{ei} + T_{fb} = 6 \text{ ms}$

$K_e = 0.5, T_{fb} = 1 \text{ ms}$



a)
$$G_r(s) = \frac{R}{R_{ref}} = \frac{1}{\frac{J T_s^* T_I}{K K_i K_e K_e} s^3 + \frac{J T_I}{K K_i K_e K_e} s^2 + T_I s + 1}$$

b) $D_i = 0.5$

$a_1 = T_I \quad a_2 = \frac{J T_I}{K K_i K_e K_e} \quad a_3 = \frac{J T_s^* T_I}{K K_i K_e K_e}$

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

$K_e = \frac{J}{2 K K_i K_e T_s^*} \Rightarrow K_e = 375.9398$

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

$T_I = \frac{2J}{K K_i K_e K_e} \Rightarrow T_I = 24 \text{ ms}$

$$c) \bar{T}_e = 0.1 \text{ s}$$

$$D_2 = 0.5$$

$$\rightarrow \boxed{\bar{T}_I = \bar{T}_e = 0.1 \text{ s}}$$

$$\rightarrow D_2 \bar{T}_e^2 = \frac{J \bar{T}_I}{K K_i K_o K_a}$$

$$K_R = \frac{J}{K K_i K_o D_2 \bar{T}_e}$$

$$\rightarrow \boxed{K_R = 30.2256}$$

$$d) e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ s [1 - G_r(s)] \cdot \frac{1}{s} \right\}$$

$$= 1 - \frac{1}{K_o}$$