SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo

Dr.sc. Edouard Ivanjko, dipl.ing.

Zbirka zadataka iz UPRAVLJANJA ELEKTROMOTORNIM POGONIMA

Zagreb, 2009.

Sažetak

Ova zbirka namijenjena je studentima diplomskog studija profila Automatika i Elektrotehnički sustavi i tehnologije koji slušaju predmet Upravljanje elektromotornim pogonima.

Sadržaj

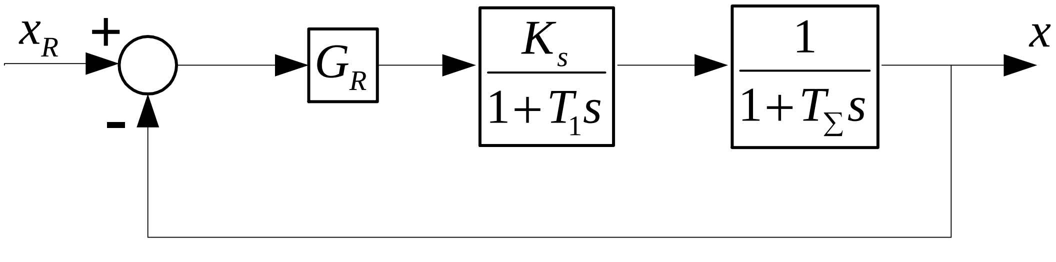
Poglavlje 1

Projektiranje regulatora pomoću optimuma dvostrukog odnosa

Primjer 1.1

Za proces prikazan na slici 1.1 zadani su sljedeći parametri:

$$K_S = 2;\ T_1 = 0.05[s];\ T_\Sigma = 0.01[s].$$



Slika 1.1: Regulacijski proces.

Potrebno je projektirati regulator takvog tipa da je moguće koristiti optimum dvostrukog odnosa odnosno da se postigne optimalno prigušenja sustava.

RJEŠENJE:

Prijenosna funkcija procesa regulacijskog sustava prikazanog na slici 1.1 dana je sljedećim izrazom:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{(1+T_1 s)(1+sT_\Sigma s)}. \tag{1.1}$$

Prilikom projektiranja regulatora korištenjem optimuma dvostrukog odnosa razmatra se sustav čiji opći oblik prijenosne funkcije zatvorenog kruga je sljedeći:

$$G(s) = \frac{y(s)}{y_R(s)} = \frac{1}{A(s)} = \frac{1}{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + ... + a_1 s + 1}. \tag{1.2}$$

Da bi se mogao primijeniti optimum dvostrukog odnosa na zadani regulacijski proces (slika 1.1) potrebno je prijenosnu funkciju otvorenog kruga svesti na oblik:

$$G_o(s) = \frac{1}{T_1 s(1+T_2 s)}. \tag{1.3}$$

U ovom slučaju to je moguće uz korištenje PI regulatora koji će kompenzirati najveću vremensku konstantu tj.

$$G_R(s) = K_R \frac{1+T_R s}{T_R s}, \tag{1.4}$$

uz $T_R = T_1 = 0.05[s]$.

Prijenosna funkcija otvorenog kruga se sada može napisati kao:

$$G_o(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) = K_R \frac{K_S}{T_1 s(1+T_\Sigma s)} = \frac{1}{\frac{T_1}{K_R K_S} s(1+T_\Sigma s)} = \frac{1}{Ts(1+T_\Sigma s)}, \tag{1.5}$$

uz $T = \frac{T_1}{K_R K_S}$.

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga se sada može napisati kao:

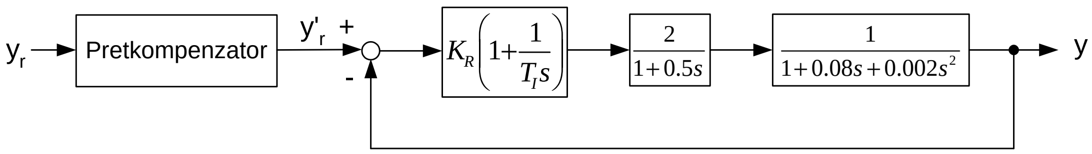
$$G_{cl}(s) = \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} = \frac{\frac{1}{Ts(1+T_\Sigma s)}}{\frac{Ts(1+T_\Sigma s)+1}{Ts(1+T_\Sigma s)}} = \frac{1}{TT_\Sigma s^2 + Ts + 1} = \frac{1}{T_o^2 s^2 + 2\zeta T_o s + 1}. \tag{1.6}$$

Karakteristični odnos $D = \frac{1}{4\zeta^2}$ mora iznositi 0.5 kako bi prigušenje sustava bilo optimalno ($\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$). Izjednačenjem pripadnih parametara u izrazu 1.6 dobije se:

$$
\begin{aligned}
&2\tfrac{\sqrt{2}}{2}T_o = T\\
&T_o = \tfrac{T}{\sqrt{2}}\\
&T_o^2 = T \cdot T_\Sigma\\
&\tfrac{T^2}{2} = T \cdot T_\Sigma\\
&T = 2T_\Sigma = \tfrac{T_1}{K_R K_S} \Rightarrow K_R = \tfrac{T_1}{2T_\Sigma K_S} = 1.25
\end{aligned}
$$

PRIMJER 1.2

Za regulacijski sustav prikazan na slici potrebno je odrediti parametre PI regulatora prema optimumu dvostrukog odnosa ($D_i = 0.5$). Ukoliko je potrebno odredite parametre pretkompenzatora.



Slika 1.2: Regulacijski proces.

RJEŠENJE:

Prijenosna funkcija procesa se može prikazati u obliku:

$$G_p(s) = \frac{2}{1+0.5s} \cdot \frac{1}{1+0.08s+0.002s^2}. \tag{1.7}$$

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga je prema tome:

$$G_{cl}(s) = \frac{K_R T_I s + K_R}{0.0005T_I s^4 + 0.021T_I s^3 + 0.29T_I s^2 + 0.5T_I s + K_R T_I s + K_R}. \tag{1.8}$$

Vrijednosti polinoma brojnika i nazivnika u skraćenom obliku su:

$$
\begin{aligned}
a_0 &= K_R & b_0 &= K_R\\
a_1 &= 0.5T_I + K_R T_I & b_1 &= K_R T_I\\
a_2 &= 0.29T_I\\
a_3 &= 0.021T_I\\
a_4 &= 0.0005T_I
\end{aligned}
$$

Jednadžbe proširenog optimuma dvostrukog odnosa u ovom slučaju daju:

$$\begin{aligned} & a_1^2 - 2a_2a_0 = \tfrac{a_0^2}{b_0^2}b_1^2 \\ & a_2^2 - 2a_3a_1 = 0 \end{aligned} \tag{1.9}$$

Uvrštenjem dobiva se sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned} & (0.5 + K_R)^2 T_I^2 - 2 \cdot 0.29 T_I K_R = T_I^2 K_R^2 \\ & 0.29^2 T_I^2 - 2\,(0.5 + K_R)\, T_I 0.021 T_I = 0 \end{aligned}$$

Kada se riješi navedeni sustav jednadžbi dobije se:

$$K_R = 1.5 \quad T_I = 0.5\,[s].$$

Kada se promotri prijenosna funkcija zatvorenog kruga 1.7 vidi se da u brojniku postoji nula. U slućaju optimuma dvostrukog odnosa teži se da brojnik prijenosne funkcije zatvorenog kruga bude jednak 1. Ukoliko se prijenosna funkcija zatvorenog kruga svede na pojačanje u stacionarnom stanju jednako 1 brojnik prelazi u $T_I s{+}1$. Prijenosna funkcija pretkompenzatora bi bila prema tome:

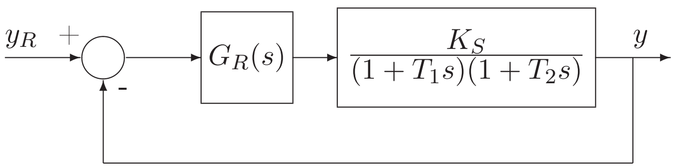
$$G_C\,(s) = \frac{1}{T_I s + 1} = \frac{1}{0.5s + 1}. \tag{1.10}$$

No ukoliko se malo bolje promotri dobivena vrijednost integracijske konstante T_I PI regulatora može se primijetiti da vrijednost odgovara najvećoj vremenskoj konstanti procesa koji se regulira. Time dolazi do kračenja nule i jednog pola u prijenosnoj funkciji otvorenog regulacijskog kruga. Iz te značajke slijedi da u ovom slučaju pretkompenzator nije potreban.

ZADACI ZA VJEŽBU:

■ Zadatak 1.1

Za regulacijski sustav prikazan na slici 1.3 potrebno je odrediti parametre PI regulatora prema optimumu dvostrukog odnosa.



Slika 1.3: Regulacijski sustav.

Zadano je $T_1 = 10[s]$, $T_2 = 1[s]$, $K_S = 0.1$ *te* $D = 0.5$.

Rješenje:

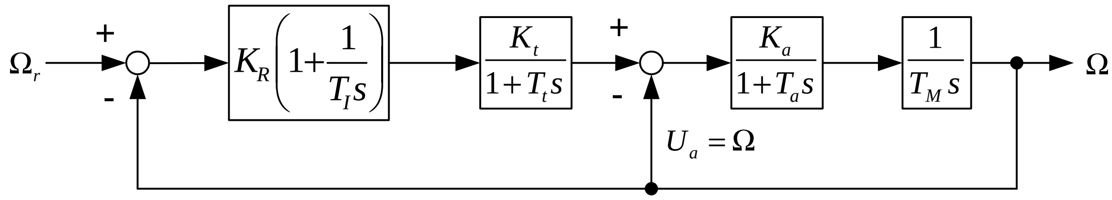
$K_R = 50$; $T_I = 10[s]$

Poglavlje 2

Projektiranje regulatora pomoću modulnog optimuma

Primjer 2.1

Za sustav regulacije prikazan na slici 2.1 potrebno je odrediti parametre PI regulatora koristeći modulni optimum.



Slika 2.1: Regulacijski sustav.

Zadano je:

- *pojačanje tiristorskog usmjerivača* $K_t = 45$;
- *nadomjesna vremenska konstanta tiristorskog usmjerivača* $T_t = 0.005[s]$;
- *pojačanje kruga armature* $K_a = 0.0612[\frac{A}{V}]$;
- *vremenska konstanta kruga armature* $T_a = 0.0184[s]$;
- *zaletna vremenska konstata* $T_M = 0.5[s]$.

Rješenje:

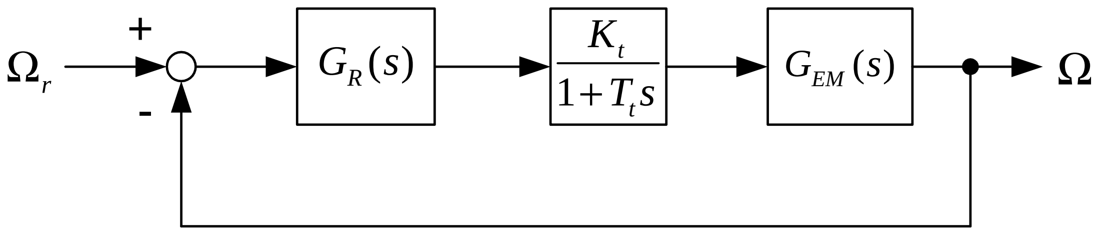
Prijenosna funkcija elektromotora može se izraziti kao:

$$G_{EM} = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_a}{T_M T_a s^2 + T_M s + K_a}. \tag{2.1}$$

Prijenosna funkcija regulatora može se izraziti kao:

$$G_R(s) = K_R \frac{1 + T_I s}{T_I s}. \tag{2.2}$$

Sustav regulacije može se sada prikazati sljedećom blokovskom shemom.



Slika 2.2: Pojednostavljeni regulacijski sustav.

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga je tada:

$$G(s) = \frac{G_R(s)\frac{K_t}{1+T_t s}G_{EM}(s)}{1 + G_R(s)\frac{K_t}{1+T_t s}G_{EM}(s)}, \tag{2.3}$$

odnosno

$$G(s) = \frac{K_a T_I K_R K_t s + K_a K_R K_t}{T_M T_a T_I T_t s^4 + T_M T_I (T_a + T_t) s^3 + T_I (T_M + T_t) s^2 + T_I (1 + K_R K_a K_t) s + K_a K_R K_t}. \tag{2.4}$$

U skraćenom zapisu vrijednosti parametara polinoma brojnika i nazivnika su:

$$\begin{aligned} a_0 &= K_a K_R K_t & b_0 &= K_a K_R K_t \\ a_1 &= T_I (1 + K_R K_a K_t) & b_1 &= K_a K_R K_t T_I \\ a_2 &= T_I (T_M + T_t) & & \\ a_3 &= T_M T_I (T_a + T_t) & & \\ a_4 &= T_M T_a T_I T_t & & \end{aligned}$$

Numeričke vrijednosti parametara su:

$$\begin{array}{ll} a_0 = 2.754K_R & b_0 = 2.754K_R \\ a_1 = T_I\left(1 + 2.754K_R\right) & b_1 = 2.754K_R T_I \\ a_2 = 0.505T_I & \\ a_3 = 0.0117T_I & \\ a_4 = 46 \cdot 10^{-6} T_I & \end{array}$$

Jednadžbe za izračun parametara regulatora korištenjem proširenog modulnog optimuma uz $n = 4$ su:

$$\begin{aligned} a_1^2 - 2a_0a_2 &= b_1^2 \\ a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 &= 0 \\ a_3^2 - 2a_2a_4 &= 0 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Uvrštenjem zadanih vrijednosti dobije se sljedeći sustav jednadžbi:

$$\begin{aligned} &T_I^2\left(1 + 2.754K_R\right)^2 - 2.782K_R T_I = \left(2.754K_R T_I\right)^2 \\ &0.25505T_I^2 - 0.0234T_I^2\left(1.2.754K_R\right) + 247.86 \cdot 10^{-6} K_R T_I = 0 \\ &0.0117^2 T_I^2 - 2 \cdot 0.505 T_I 46 \cdot 10^{-6} T_I = 0 \end{aligned} \tag{2.6}$$

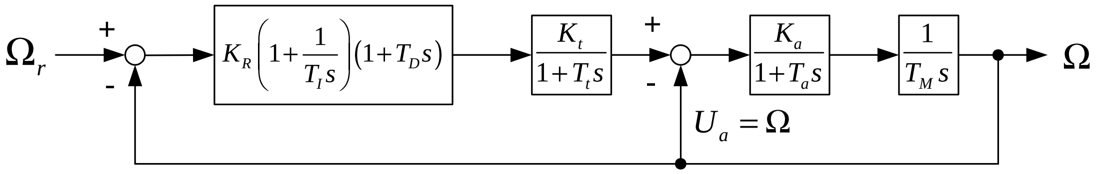
Promotri li se treća jednadžba dobivenog sustava jednadžbi vidi se da predstavlja oblik *stalnica* $= 0$ što nije ispunjeneno. Slijedi da ovakva struktura regulatora ne može zadovoljiti kriterije modulnog optimuma što znači da će regulacijski sustav raditi u suboptimalnom području. Uz izlučenje $T_I = -\dfrac{253.368 \cdot 10^{-6} K_R}{0.231625 - 0.0644436K_R}$ slijedi rješenje:

$K_R = \boxed{3.63}, \quad T_I = \boxed{0.11}\,[s]\,.$

ZADACI ZA VJEŽBU:

■ Zadatak 2.1

Za sustav regulacije na slici potrebno je odrediti uvjete za određivanje parametara PID regulatora koristeći modulni optimum.



Slika 2.3: Regulacijski sustav.

Zadano je:

- *pojačanje tiristorskog usmjerivača* $K_t = 45$;
- *vremenska konstanta tiristorskog usmjerivača* $T_t = 0.005[s]$;
- *pojačanje kruga armature* $K_a = 0.0612[\frac{A}{V}]$;
- *vremenska konstanta kruga armature* $T_a = 0.0184[s]$;
- *zaletna vremenska konstata* $T_M = 0.5[s]$.

Rješenje:

Jednadžbe proširenog modulnog optimuma uz $n = 4$ glase:

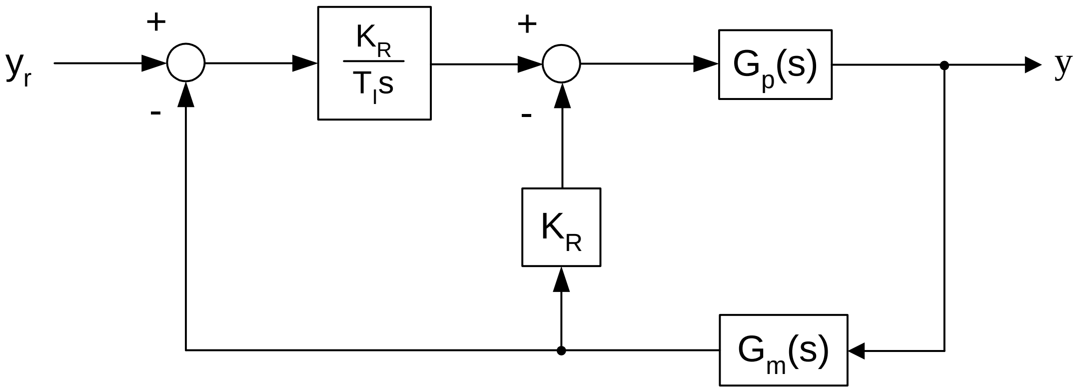
$$\begin{aligned} a_1^2 - 2a_0a_2 &= b_1^2 - 2b_0b_1 \\ a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 &= b_2^2 \\ a_3^2 - 2a_2a_4 &= 0 \end{aligned}.$$

Uz uvrštenje dobije se:

$$(T_I+2.754K_R(T_I+T_D))^2-5.508K_RT_I(0.505+2.754T_DK_R)=7.585K_R^2(T_I+T_D)^2-15.169K_R^2T_IT_D$$
$$T_I^2(0.505+2.754T_DK_R)^2-0.0234T_I(T_I+2.754K_R(T_I+T_D))+253.368\cdot10^{-6}K_RT_I=7.585K_R^2T_I^2T_D^2$$
$$K_RT_D=0.365$$

■ Zadatak 2.2

Za sustav regulacije na slici 2.4 potrebno je projektirati modificirani PI regulator prema modulnom optimumu.



Slika 2.4: Regulacijski sustav.

Zadano je:

- *prijenosna funkcija procesa* $G_p(s) = \frac{10}{s^2+s+1}$;

- *prijenosna funkcija mjernog člana* $G_m(s) = \frac{5}{10s+1}$.

Rješenje:

Prijenosna funkcija zatvorenog kruga je:

$$G_{cl}(s) = \frac{y(s)}{y_r(s)} = \frac{K_R G_p(s)}{T_I s + G_m(s) G_p(s) K_R + K_R T_I s G_m(s) G_p(s)}. \tag{2.7}$$

Uvrštenjem prijenosne funkcije procesa te sređenjem dobije se:

$$G_{cl}(s) = \frac{y(s)}{y_r(s)} = \frac{100 K_R s + \boxed{1}}{10 T_I s^4 + 11 T_I s^3 + 11 T_I s^2 + (T_I + 50 K_R T_I) s + 50 K_R}. \tag{2.8}$$

U skračenom obliku se prijenosna funkcija zatvorenog kruga može prikazati u obliku:

$$G_{cl}(s) = \frac{y(s)}{y_r(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \tag{2.9}$$

sa sljedećim vrijednostima parametara:

$$
\begin{aligned}
b_0 &= 10K_R \\
b_1 &= 100K_R \\
a_0 &= 50K_R \\
a_1 &= T_I + 50K_R T_I \\
a_2 &= 11T_I \\
a_3 &= 11T_I \\
a_4 &= 10T_I
\end{aligned}
$$

Izrazi za prošireni modulni optimum u ovom slučaju glase:

$$
\begin{aligned}
a_1^2 - 2a_0a_2 &= b_1^2 \\
a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 &= 0 \\
a_3^2 - 2\boxed{a_1}a_4 &= 0
\end{aligned}
$$

Uvrštnjem i sređenjem dobije se sustav jednadžbi:

$$
\begin{aligned}
T_I^2\left(1 + 50K_R\right)^2 - 1100K_RT_I &= 10000K_R^2 \\
121T_I - 22T_I\left(1 + 50K_R\right) + 1000K_R &= 0
\end{aligned}
$$

Rješenjem sustava jednažbi dobiju se paramatri regulatora u suboptimalnom području:

$K_R = 0.1214 \qquad T_I = 3.515[s].$

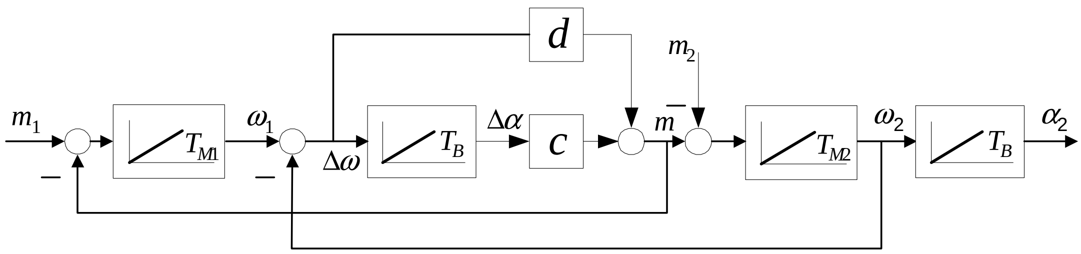
Poglavlje 3

Dvomaseni elastični sustav

Primjer 3.1

Za sustav prikazan na slici 3.1 zadani su sljedeći parametri:

$$T_{M1} = 0.166[s];\ T_{M2} = 0.333[s];\ c = 1128[Nm/rad];\ d = 0.25[Nms/rad];\ T_B = 1[s]$$



Slika 3.1: Strukturni blokovski prikaz dvomasenog elastičnog sustava.

Potrebno je:

a) Odrediti izraz za prijenosnu funkciju: $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$;

b) Odrediti vrijednost sljedećih veličina:

$$\Omega_{01} =?;\ \Omega_{02} =?;\ \Omega_0 =?;\ \zeta_1 =?;\ \zeta_2 =?;\ \zeta =?;$$

c) Odrediti vrijednost nula i polova u prijenosnoj funkciji $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$;

RJEŠENJE:

Za mjesta gdje se nalaze zbrajala u strukturnom blokovskom prikazu vrijede sljedeći izrazi:

$$(M_1 - M) \cdot \frac{1}{T_{M1}s} = \Omega_1, \tag{3.1}$$

$$(\Omega_1 - \Omega_2)(d + \frac{c}{T_B s}) = M. \tag{3.2}$$

Moment na strani tereta se može izraziti:

$$M \cdot \frac{1}{T_{M2}s} = \Omega_2 \Rightarrow M = T_{M2}s\Omega_2. \tag{3.3}$$

Uvrštenjem izraza 3.3 u izraz 3.1 dobije se:

$$(M_1 - T_{M2}s\Omega_2)\frac{1}{T_{M1}s} = \Omega_1, \tag{3.4}$$

odnosno uvrštenjem izraza 3.3 u izraz 3.2:

$$(\Omega_1 - \Omega_2)(d + \frac{c}{T_B s}) = T_{M2}s\Omega_2. \tag{3.5}$$

Uvštenjem izraza 3.4 u izraz 3.5 dobije se:

$$\left[(M_1 - T_{M2}s\Omega_2)\frac{1}{T_{M1}s} - \Omega_2\right](d + \frac{c}{T_B s}) = T_{M2}s\Omega_2. \tag{3.6}$$

Nakon sređenja dobije se tražena prijenosna funkcija:

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{\frac{d}{c}T_B s + 1}{(T_{M1} + T_{M2})s\left[\frac{s^2}{\frac{c}{T_B}(\frac{1}{T_{M1}} + \frac{1}{T_{M2}})} + \frac{d}{c}T_B s + 1\right]}, \tag{3.7}$$

odnosno uvrštenjem zadanih vrijednosti:

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{2.216 \cdot 10^{-4}s + 1}{0.5s \cdot (9.82 \cdot 10^{-5}s^2 + 2.216 \cdot 10^{-4}s + 1)}. \tag{3.8}$$

Iz izraza 3.7 se sada mogu izvući traženi parametri:

$$\Omega_{01} = \sqrt{\frac{c}{T_B T_{M1}}} = 82.433[\frac{rad}{s}];$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{c}{T_B T_{M2}}} = 58.2[\frac{rad}{s}];$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{c}{T_B}(\frac{1}{T_{M1}} + \frac{1}{T_{M2}})} = 100.91[\frac{rad}{s}];$$

$$\zeta_1 = \frac{d}{2c} T_B \Omega_{01} = 0.009135;$$

$$\zeta_2 = \frac{d}{2c} T_B \Omega_{02} = 0.00645;$$

$$\zeta = \frac{d}{2c} T_B \Omega_0 = 0.01118.$$

Tražene nule i polovi su prema tome:

$$s_{n1} = \frac{-1}{2.216 \cdot 10^{-4}} = -4512.6;$$

$$s_{p1} = 0;$$

$$s_{p2} = -1.1282 + j100.9;$$

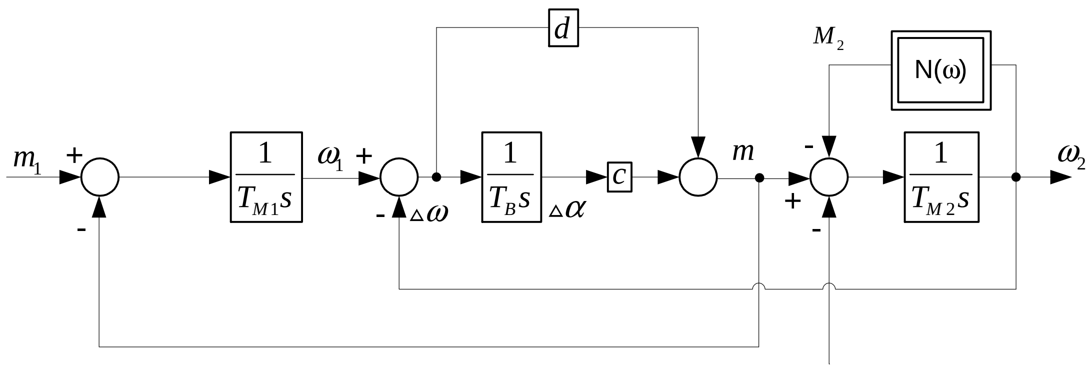
$$s_{p3} = -1.1282 - j100.9.$$

ZADACI ZA VJEŽBU:

■ Zadatak 3.1

Za sustav prikazan na slici 3.2 zadani su sljedeći parametri:

$$T_{M1} = 0.166[s];\ T_{M2} = 0.333[s];\ c = 1128[Nm/rad];\ d = 0.25[Nms/rad];\ T_B = 1[s];$$
$$N(\Omega) = -6.4arctg(10[s/rad]\cdot\Omega)[Nm]$$



Slika 3.2: Strukturni blokovski prikaz nelinearnog dvomasenog elastičnog sustava.

Potrebno je:

- *linearizirati nelinearnost oko* $\omega_2 = 0[rad/s]$*;*
- *odrediti prijenosnu funkciju* $\frac{\omega_2(s)}{m_1(s)}$*;*
- *odrediti model dvomasenog elastičnog sustava u prostoru stanja uz vektor stanja jednak* $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_1 & \Delta\alpha & \omega_2 \end{bmatrix}^T$*;*
- *odrediti vrijednost parametara u traženoj prijenosnoj funkciji te model u prostoru stanja.*

Rješenje:

Linearizirana nelinearnost: N(ω) $=K\cdot\omega$ uz $K = -64$.

Tražena prijenosna funkcija:

$$\frac{\omega_2(s)}{m_1(s)} = \frac{1+\frac{\mathrm{d}}{c}T_B s}{\frac{T_{M1}T_{M2}T_B}{c}s^3 + s^2\left(\frac{kT_{M1}T_B+\mathrm{d}T_{M1}T_B+\mathrm{d}T_{M2}T_B}{c}\right) + s\left(T_{M1}+T_{M2}+\frac{\mathrm{d}kT_B}{c}\right) + K}.$$

Uvrštenjem zadanih vrijednosti dobije se:

$$\frac{\omega_{2(\mathrm{s})}}{m_1(s)} = \frac{1 + 0.000022s}{0.000049s^3 \boxed{-10.50}s^2 + 0.485s - 64}.$$

Model u prostoru stanja:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\Delta\alpha} \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{d}{T_{M1}} & \boxed{-\frac{c}{T_{M1}}} & \frac{d}{T_{M1}} \\ \frac{1}{T_B} & 0 & -\frac{1}{T_B} \\ \frac{d}{T_{M2}} & \boxed{\frac{c}{T_{M2}}} & -\frac{(d+k)}{T_{M2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \Delta\alpha \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{M1}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot M_1.$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \Delta\alpha \\ \omega_2 \end{bmatrix} + [0] \cdot m_1.$$

Uvrštenjem zadanih vrijednosti dobije se:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\Delta\alpha} \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.51 & -6795 & 1.51 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0.751 & 3387 & 191.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \Delta\alpha \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boxed{0.166} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot M_1.$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \Delta\alpha \\ \omega_2 \end{bmatrix} + [0] \cdot m_1.$$

■ ZADATAK 3.2

Za dvomaseni elastični sustav prikazan na slici 3.3 zadani su sljedeći normirani parametri:

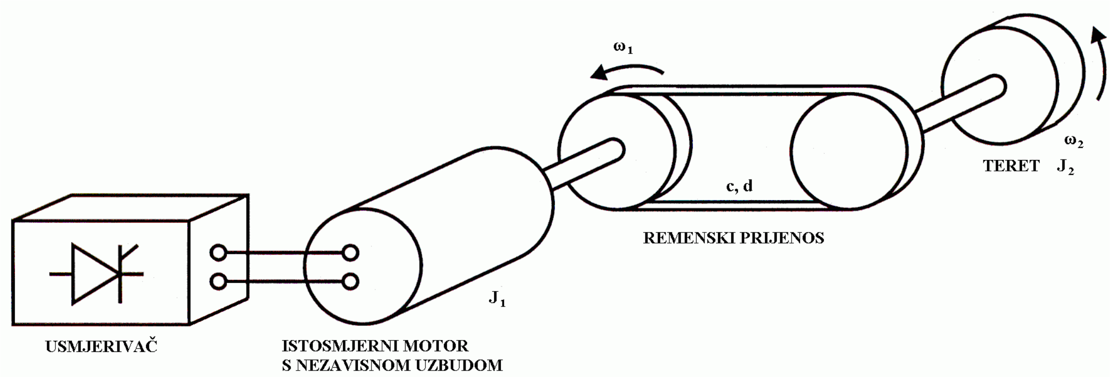
$$T_{M1} = 1.0[s];\ T_{M2} = 4.0[s];\ c = 100[Nm/rad];\ d = 0.5[Nms/rad];\ T_B = 1[s]$$

Potrebno je nacrtati strukturnu blokovsku shemu nadomjesnog kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s modificiranim PI regulatorom te odrediti parametre regulatora uz korištenje optimuma dvostrukog odnosa ($D_i = 0.5$), nadomjesnu vremensku konstantu podređenog regulacijskog kruga struje $T_{ei} = 0.01\,[s]$ i vrijeme uzorkovanja $T = 0.001\,[s]$.

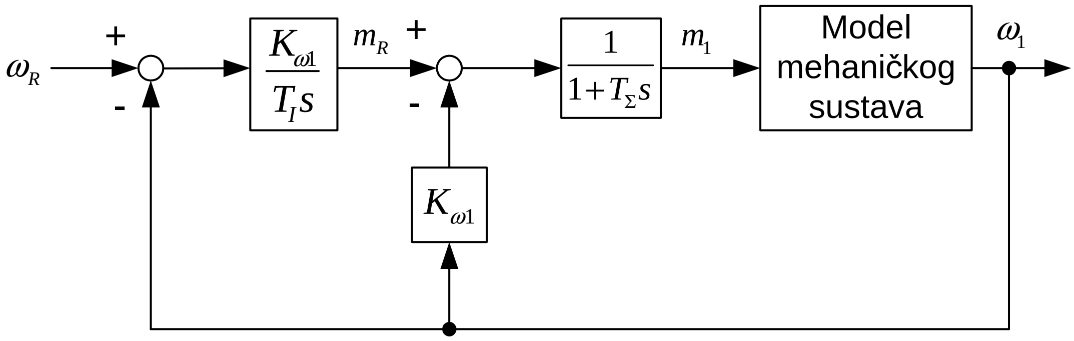
Napomena: *Nadomjesnu vremensku konstantu zatvorenog kruga odredite koristeći približnu relaciju.*

RJEŠENJE:

Parametri modificiranog PI regulatora iznose $T_I = 0.578[s]$ i $K_{\omega 1} = 22.75$.



Slika 3.3: Skica radnog stroja s remenskim prijenosom.



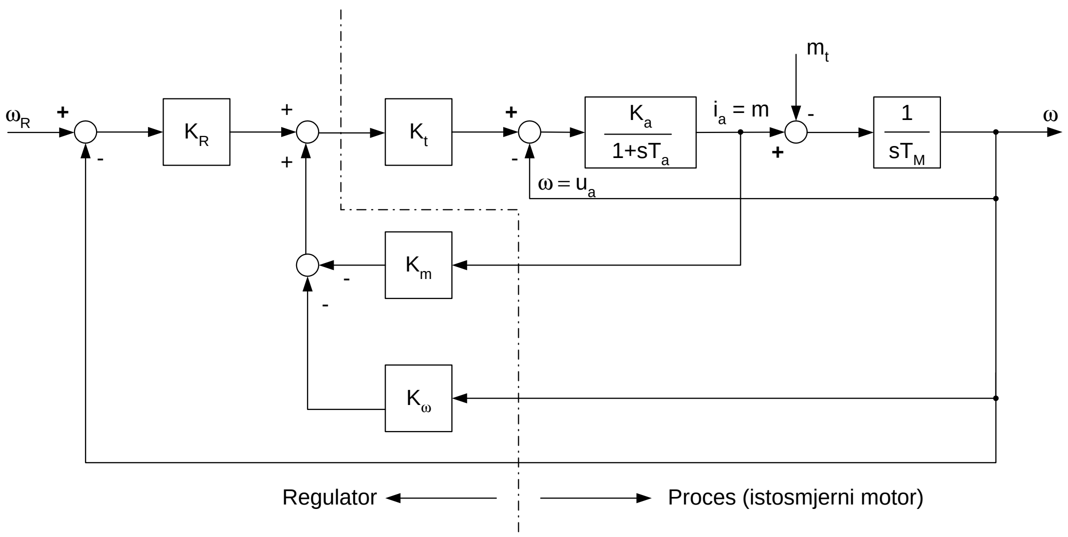
Slika 3.4: Nadomjesna shema kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje dvomasenog elastičnog sustava s modificiranim PI regulatorom.

Poglavlje 4

Projektiranje regulatora po varijablama stanja

Primjer 4.1

Na slici 4.1 prikazana je strukturna blokovska shema regulacije istosmjernog motora s konstantnom i nezavisnom uzbudom korištenjem regulatora po varijablama stanja.



Slika 4.1: Regulacijski sustav istosmjernog motora s konstantnom i nezavisnom uzbudom upravljanog regulatorom po varijablama stanja.

Zadano je:

- *pojačanje tiristorskog usmjerivača* $K_t = 1.5$;
- *pojačanje kruga armature* $K_a = 10$;
- *vremenska konstanta kruga armature* $T_a = 0.005[s]$;
- *zaletna vremenska konstata* $T_M = 0.5[s]$.

Potrebno je:

- *odrediti izraz za prijenosnu funkciju* $G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_R(s)}$;
- *odrediti pojačanje zatvorenog kruga u stacionarnom stanju u slučaju skokovite promjene reference* $\lim\limits_{t\to\infty} h_\omega(t)$;
- *odrediti iznos pojačanje regulatora brzine vrtnje* K_ω *da pogreška u stacionarnom stanju bude jednaka 0;*
- *odrediti iznose ostala dva parametra regulatora (*K_m *i* K_R*) tako da prijenosna funkcije zatvorenog kruga poprimi oblik* $G_\omega(s) = \frac{1}{(1+sT_Z)^2}$ $(T_Z = 0.01[s])$;
- *odrediti pogrešku u stacionarnom stanju u slučaju skokovite smetnje* $\Delta m_t(t) = M_t \cdot S(t)$;
- *odrediti uvijet koji mora biti ispunjen da pogreška u odnosu na skokovitu smetnju u stacionarnom stanju bude nula;*
- *odrediti iznos pogreške u stacionarnom stanju za izračunate parametre regulatora u slučaju skokovite smetnje* $\Delta m_t(t) = S(t)$.

Napomena: *Sve parametre regulatora i traženih prijenosnih funkcija izraziti preko parametara procesa te izračunati pripadne vrijednosti.*

Rješenje:

Za sumatorska mjesta na slici 4.1 vrijedi:

$$((\omega_R - \omega) K_R - (K_m i_a + K_\omega \omega)) K_t - \omega = \frac{i_a}{\frac{K_a}{1+sT_a}}; \tag{4.1}$$

$$\omega = \frac{i_a}{sT_M}. \tag{4.2}$$

Kombiniranjem gornjih izraza te njihovim sređenjem dobije se:

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_R(s)} = \frac{1}{\frac{T_M T_a}{K_t K_R K_A} s^2 + \left(\boxed{1} + \frac{K_m T_M}{K_R} + \frac{T_M}{K_t K_R \boxed{K_m}}\right) s + \left(1 + \frac{K_\omega}{K_R} + \frac{1}{K_t K_R}\right)}. \tag{4.3}$$

Pojačanje u stacionarnom stanju u odnosu na skokovitu promjenu reference je prema tome:

$$\lim_{t\to\infty} h_\omega(t) = \lim_{s\to 0} G_\omega(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_\omega}{K_R} + \frac{1}{K_t K_R}}. \tag{4.4}$$

Da bi pogreška u stacionarnom stanju bila 0 mora biti ispunjeno:

$$1 + \frac{K_\omega}{K_R} + \frac{1}{K_t K_R} = 1 \Rightarrow K_\omega = -\frac{1}{K_t} = -0.66. \tag{4.5}$$

Ukoliko $K_\omega = -\frac{1}{K_t}$ uvrstimo u izraz 4.3 dobivamo:

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_R(s)} = \frac{1}{\frac{T_M T_a}{K_t K_R K_a} s^2 + \left(\boxed{1} + \frac{K_m T_M}{K_R} + \frac{T_M}{K_t K_R K_m}\right) s + 1}. \tag{4.6}$$

Željeno ponašanje sustava dano je sljedećom prijenosnom funkcijom zatvorenog kruga:

$$G_\omega(s) = \frac{1}{(1 + sT_Z)^2} = \frac{1}{1 + 2sT_Z + s^2 T_Z^2} = \frac{1}{1 + 0.02s + 0.0001s^2}. \tag{4.7}$$

Izjednačenjem koeficijenata između izraza 4.6 i 4.7 slijedi:

$$\frac{K_m T_M}{K_R} + \frac{T_M}{K_t K_R \boxed{K_m}} = 2T_Z;$$

$$\frac{T_M T_a}{K_t K_R K_a} = T_Z^2.$$

Uvrštenjem zadanih vrijednosti slijedi vrijednost parametra K_R regulatora po varijablama stanja:

$$K_R = \frac{T_M T_a}{T_Z^2 K_t K_a} = 1.67.$$

Uvrštenjem njegove vrijednosti dobiva se kvadratna jednadžba:

$$0.3K_m^2 + 0.98K_m + 0.2 = 0,$$

odnosno njezinim rješavanjem moguća rješenja:

$$K_{m1} = -2.78$$
$$K_{m2} = -0.48$$

U slučaju stacionarnog stanja za skokovitu smetnju vrijedi:

$$m_{t\infty} = m_{\infty} = i_{a\infty}; \tag{4.8}$$

$$\left(-\omega_{\infty} K_R - \left(K_m i_{a\infty} + K_{\omega}\omega_{\infty}\right)\right) K_t - \omega_{\infty} = \frac{i_{a\infty}}{K_a}. \tag{4.9}$$

Sređenjem se dobije:

$$\frac{\omega_{\infty}}{m_{t\infty}} = \frac{\frac{1}{K_a} + K_m K_t}{1 + K_{\omega} K_t + K_R K_t}. \tag{4.10}$$

Uz $K_{\omega} = -\frac{1}{K_t}$ (pogreška u stacionarnom stanju jednaka nula na skokovitu promjenu reference brzine):

$$\frac{\omega_{\infty}}{m_{t\infty}} = -\frac{1}{K_R K_t}\left(\frac{1}{K_a} + K_m K_t\right). \tag{4.11}$$

Da bi pogreška bila nula mora biti ispunjeno:

$$\frac{1}{K_a} + K_m K_t = 0 \Rightarrow K_m = -\frac{1}{K_a K_t}. \tag{4.12}$$

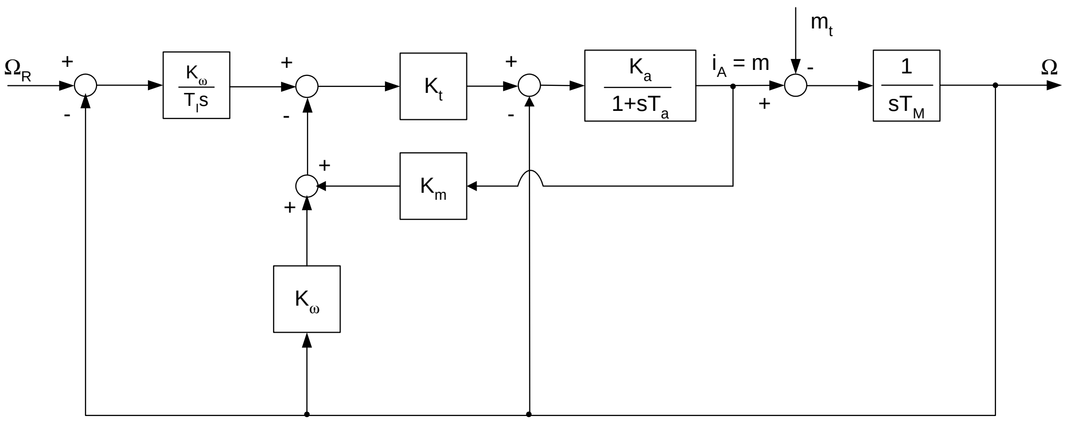
U slučaju izračunatih vrijednosti regulatora pogreška će biti:

$$\frac{\omega_{\infty}}{m_{t\infty}} = \boxed{-0.294.} \tag{4.13}$$

Primjer 4.2

Za na slici 4.2 prikazan regulacijski sustav potrebno je:

- *odrediti izraz za prijenosnu funkciju* $\frac{\Omega(s)}{\Omega_R(s)}$*;*
- *iz dobivene prijenosne funkcije odrediti uvijete po kojima se parametri regulatora mogu podesiti po optimumu dvostrukog odnosa te modulnom optimumu;*
- *objasniti razliku podešenja regulatora po optimumu dvostrukog odnosa te modulnog optimuma.*



Slika 4.2: Regulacijski sustav istosmjernog motora s konstantnom i nezavisnom uzbudom upravljanog regulatorom po varijablama stanja.

Rješenje:

Na osnovu slike 4.2 mogu se napisati sljedeći izrazi:

$$\Omega(s) = \frac{1}{sT_M} I_a(s) \quad => \quad I_a(s) = sT_M \Omega(s), \tag{4.14}$$

$$sT_M\Omega(s)=\frac{K_a}{1+sT_a}\left(\frac{K_tK_\omega}{T_Is}\Omega_R(s)-\frac{K_tK_\omega}{T_Is}\Omega(s)-K_tK_\omega\Omega(s)-sK_MT_MK_t\Omega(s)-\Omega(s)\right). \tag{4.15}$$

Sređenjem dobiva se:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_R(s)}=\frac{K_aK_tK_\omega}{T_MT_IT_as^3+T_MT_I(1+K_aK_MK_t)s^2+K_aT_I(K_tK_\omega+1)s+K_aK_tK_\omega}, \tag{4.16}$$

odnosno

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_R(s)} = \frac{1}{s^3\frac{T_MT_IT_a}{K_aK_tK_\omega} + s^2T_MT_I\left(1 + \frac{1}{K_aK_MK_t}\right) + T_Is\left(1 + \frac{1}{K_tK_\omega}\right) + 1}. \tag{4.17}$$

Vrijednosti parametara u skraćenom zapisu su:

$$
\begin{gathered}
a_0 = 1, \\
a_1 = T_I \left(1 + \tfrac{1}{K_t K_\omega}\right), \\
a_2 = T_M T_I \left(1 + \tfrac{1}{K_a K_M K_t}\right), \\
a_3 = \tfrac{T_M T_I T_a}{K_a K_t K_\omega}.
\end{gathered}
$$

U slučaju podešenje parametara regulatora prema optimumu dvostrukog odnosa vrijedi sljedeći odnos između vrijednosti parametara prijenosne funkcije zatvorenog kruga u skraćenom zapisu:

$$\frac{a_i a_{i-2}}{a_{i-1}^2} = D_i. \tag{4.18}$$

U ovom slučaju mogu se napisati sljedeći uvijeti:

$$
\begin{gathered}
\tfrac{a_2 a_0}{a_1^2} = D_2 \qquad\qquad \tfrac{a_3 a_1}{a_2^2} = D_3 \\
\tfrac{T_M\left(1+\frac{1}{K_a K_M K_t}\right)}{T_I\left(1+\frac{1}{K_t K_\omega}\right)^2} = D_2 \quad \tfrac{T_a\left(1+\frac{1}{K_t K_\omega}\right)}{K_a K_t K_\omega T_M\left(1+\frac{1}{K_a K_M K_t}\right)} = D_3
\end{gathered} \tag{4.19}
$$

U slučaju da je poznata vremenska konstanta T_e željena prijenosna funkcija zatvorenog kruga može se prikazati u obliku:

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{D_2^2 D_3 T_e^3 s^3 + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1}. \tag{4.20}$$

Izjednačavanjem pripadnih koeficijenata u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga slijede sljedeći uvijeti:

$$T_I \frac{K_t K_\omega + 1}{K_t K_\omega} = T_e \qquad T_M T_I \frac{K_a K_M K_t + 1}{K_a K_M K_t} = D_2 T_e \qquad \frac{T_M T_I T_a}{K_a K_t K_\omega} = D_2^2 D_3 T_e \tag{4.21}$$

U slučaju modulnog optimuma vrijede sljedeći izrazi:

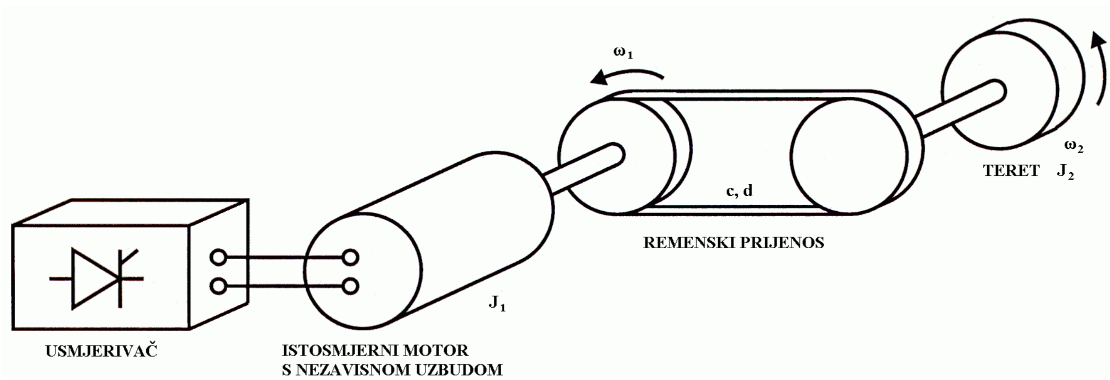
$$
\begin{gathered}
a_1^2 - 2a_0 a_2 = 0 \\
T_I^2 \left(\tfrac{1+K_t K_\omega}{K_t K_\omega}\right)^2 - 2T_M T_I \tfrac{K_a K_M K_t + 1}{K_a K_M K_t} = 0 \\
a_2^2 - 2a_1 a_3 = 0 \\
T_M^2 T_I^2 \left(\tfrac{1+K_a K_M K_t}{K_a K_M K_t}\right)^2 - 2\tfrac{T_M T_I^2 T_a}{K_a K_t^2 K_\omega^2}\left(1 + K_t K_\omega\right) = 0
\end{gathered} \tag{4.22}
$$

Ideja podešenja regulatora prema optimumu dvostrukog odnosa je postizanje optimalnog iznosa prigušenja od $\frac{\sqrt{2}}{2}$. Prednost mu je što je izračun parametara regulatora relativno jednostavan. Iznos prigušenja je nešto veći nego u slučaju modulnog optimuma koji pak ima brži odziv. Ideja podešenja regulatora prema modulnom optimumu jest da amplitudno-frekvencijska karakteristika zatvorenog kruga ima što širi propusni opseg bez rezonantnog izdizanja. Što je red sustava veći smanjuje se prigušenje odnosno raste oscilatornost sustava. Nedostatak je složeniji postupak izračuna parametara regulatora.

Primjer 4.3

Za sustav na slici 4.3 zadani su sljedeći normirani parametri:

$$T_{M1} = 1.0[s] \text{ - } \textit{motor; } T_{M2} = 4.0[s] \text{ - } \textit{teret;}$$
$$c = 100[Nm/rad] \text{ - } \textit{konstanta krutosti;}$$
$$d = 0.5[Nms/rad] \text{ - } \textit{konstanta prigušenja;}$$
$$T_B = 1[s] \text{ - } \textit{normirana vremenska konstanta}$$



Slika 4.3: Skica radnog stroja s remenskim prijenosom.

Potrebno je:

a) Odrediti izraz za prijenosnu funkciju: $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$;

b) Odrediti vrijednost sljedećih veličina:

$$\Omega_{01} = ?;\ \Omega_{02} = ?;\ \Omega_0 = ?;\ \zeta_1 = ?;\ \zeta_2 = ?;\ \zeta = ?;$$

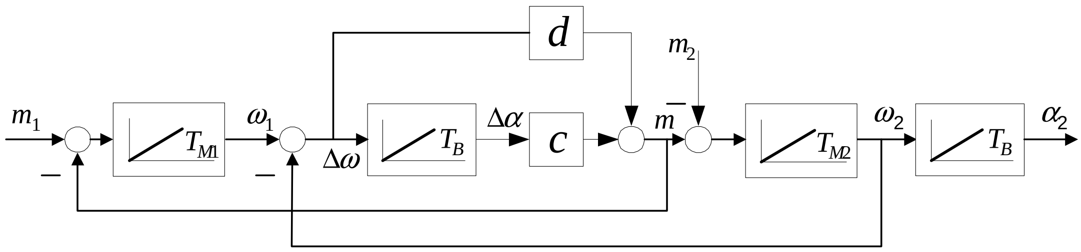
c) Odrediti vrijednost nula i polova u prijenosnoj funkciji $\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)}$;

d) Nacrtati strukturnu blokovsku shemu nadomjesnog kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s regulatorom stanja punog reda;

e) Projektirati regulator brzine vrtnje s time da struktura odgovara ***regulatoru stanja punog reda*** *, Regulator treba podesiti po optimumu dvostrukog odnosa* ($D_i = 0.5$) *uz nadomjesnu vremensku konstantu podređenog regulacijskog kruga struje* $T_{ei} = 0.01[s]$ *te vrijeme uzorkovanja* $T = 0.001[s]$.

Rješenje:

Tražena prijenosna funkcija se može odrediti iz nadomjesne sheme elektromehaničkog dijela regulacijskog sustava prikazane na slici 4.4.



Slika 4.4: Strukturni blokovski prikaz dvomasenog elastičnog sustava.

Za sumatorska mjesta vrijede sljedeći izrazi:

$$\Omega_1 = \frac{1}{T_{M1}s}\left(M_1 - M\right), \tag{4.23}$$

$$M = \left(\frac{c}{T_B s} + d\right)\left(\Omega_1 - \Omega_2\right), \tag{4.24}$$

$$\Omega_2 = \frac{1}{T_{M2}s}\left(M - M_2\right). \tag{4.25}$$

U razmatranju tražene prijenosne funkcije $M_2(s)$ predstavlja smetnju pa se taj utjecaj moǐzbaciti:

$$\Omega_2 = \frac{1}{T_{M2}s}M. \tag{4.26}$$

Izjednačenjem gornjih jednadžbi dobije se:

$$T_{M2}s\Omega_2 = \left(\frac{c}{T_B s} + d\right)\left(\frac{1}{T_{M1}s}\left(M_1 - T_{M2}s\Omega_2\right)\right), \tag{4.27}$$

$$\frac{c + dT_B s}{s}M_1 = \Omega_2\left(T_B T_{M1} T_{M2} s^2 + c\left(T_{M1} + T_{M2}\right) + dT_B s\left(T_{M1} + T_{M2}\right)\right), \tag{4.28}$$

te slijedi da je tražena prijenosna funkcija:

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{\frac{dT_B}{c}s + 1}{s\left(T_{M1} + T_{M2}\right)\left(\frac{T_B T_{M1} T_{M2}}{c\left(T_{M1}+T_{M2}\right)}s^2 + \frac{dT_B}{c}s + 1\right)}. \tag{4.29}$$

Može se svesti na standardni oblik:

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{\frac{2\zeta_2}{\Omega_{02}}s + 1}{T_{M\Sigma}s\left(\frac{s^2}{\Omega_0^2} + \frac{2\zeta}{\Omega_0}s + 1\right)}. \tag{4.30}$$

Vrijednosti veličina su sljedeće:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{c}{T_B}\left(\frac{1}{T_{M1}} + \frac{1}{T_{M2}}\right)} = 11.8\left[\frac{rad}{s}\right] \tag{4.31}$$

$$T_{M\Sigma} = T_{M1} + T_{M2} = 5\,[s] \tag{4.32}$$

$$\Omega_{01} = \sqrt{\frac{c}{T_B T_{M1}}} = 10\left[\frac{rad}{s}\right] \tag{4.33}$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{c}{T_B T_{M2}}} = 5\left[\frac{rad}{s}\right] \tag{4.34}$$

$$\zeta = \frac{d}{2c}T_B\Omega_0 = 0.0279 \tag{4.35}$$

$$\zeta_1 = \frac{d}{2c}T_B\Omega_{01} = 0.025 \tag{4.36}$$

$$\zeta_2 = \frac{d}{2c}T_B\Omega_{02} = 0.0125 \tag{4.37}$$

Uvrste li se izračunate vrijednosti u određenu prijenosnu funkciju dobije se:

$$\frac{\Omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{0.005s + 1}{5s\left(0.008s^2 + 0.005s + 1\right)} \tag{4.38}$$

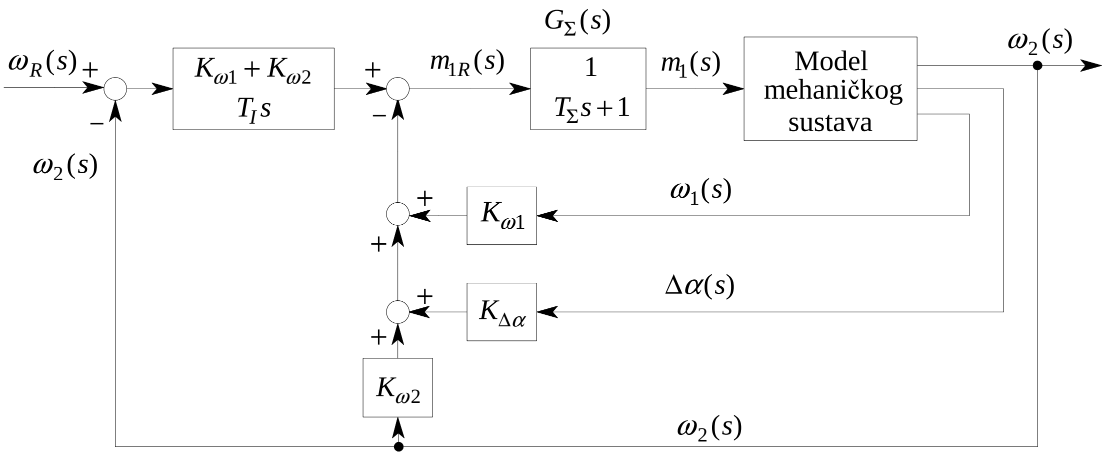
Sada slijede iznosi nula:

$$s_n = -200 \tag{4.39}$$

te polova:

$$\begin{aligned} s_{p1} &= 0 \\ s_{p2} &= -0.3012 + j10.9723 \\ s_{p3} &= -0.3012 - j10.9723 \end{aligned} \tag{4.40}$$

Strukturna blokovska shema nadomjesnog regulacijskog kruga brzine vrtnje s regulatorom stanja punog reda prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5: Strukturna blokovska shema nadomjesnog kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s regulatorom stanja punog reda.

Prijenosna funkcija nadomjesnog regulacijskog kruga brzine vrtnje jednaka je:

$$G_{cl}(s) = \frac{\omega_2(s)}{\omega_R(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\frac{2\zeta_2}{\Omega_{02}}s + 1}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \tag{4.41}$$

uz sljedeće vrijednosti parametara:

$$\begin{aligned}
a_1 &= T_I + 2\zeta_2\Omega_{02}^{-1},\\
a_2 &= (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}T_I T_{M\Sigma} + 2\zeta_2 T_I \Omega_{02}^{-1} + (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}K_{\Delta\alpha}T_I T_B^{-1}\Omega_{02}^{-2},\\
a_3 &= (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}T_I T_{M\Sigma}(T_\Sigma + 2\zeta\Omega_0^{-1}) + (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}K_{\omega1}T_I\Omega_{02}^{-2},\\
a_4 &= (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}T_I T_{M\Sigma}(2\zeta\Omega_0^{-1}T_\Sigma + \Omega_0^{-2}),\\
a_5 &= (K_{\omega1}+K_{\omega2})^{-1}T_I T_{M\Sigma}T_\Sigma\Omega_0^{-2}.
\end{aligned}$$

Karakteristični polinom se podešava prema optimumu dvostrukog odnosa uz $D_i = 0,5$. Uz $n = 5$ karakteristični polinom bi glasio:

$$A(s) = D_5 D_4^2 D_3^3 D_2^4 T_e^5 s^5 + D_4 D_3^2 D_2^3 T_e^4 s^4 + D_3 D_2^2 T_e^3 s^3 + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1. \tag{4.42}$$

Nadomjesna vremenska konstanta otvorenog kruga jednaka je:

$$T_\Sigma = T_{ei} + T = 0.011[s]. \tag{4.43}$$

Nadomjesna vremenska konstanta zatvorenog kruga jednaka je:

$$T_e = \frac{T_\Sigma}{D_5 D_4 D_3 D_2 (1 + 2\zeta T_\Sigma \Omega_0)} = 0.175[s]. \tag{4.44}$$

Integralna vremenska konstanta regulatora stanja punog reda je:

$$T_I = T_e - \frac{2\zeta_2}{\Omega_{02}} = 0.17\,[s]\,. \tag{4.45}$$

Za tražena pojačanja vrijede sljedeći izrazi:

$$K_{\omega 1} = \frac{T_{M\Sigma}\Omega_{02}^2}{\Omega_0}\left(\frac{1 + 2\zeta T_\Sigma \Omega_0}{D_4 D_3 D_2 T_e \Omega_0} - T_\Sigma \Omega_0 - 2\zeta\right) = \boxed{45,94;} \tag{4.46}$$

$$K_{\omega 2} = \frac{T_I T_{M\Sigma}(1 + 2\zeta T_\Sigma \Omega_0)}{D_4 D_3^2 D_2^3 T_e^4 \Omega_0^2} - K_{\omega 1} = \boxed{1915,68;} \tag{4.47}$$

$$K_{\Delta\alpha} = \frac{D_2 T_e^2 \Omega_{02}^2 - (K_{\omega 1} + K_{\omega 2})^{-1} T_{M\Sigma} T_I \Omega_{02}^2 - 2\zeta_2 (T_e \Omega_{02} - 2\zeta_2)}{(K_{\omega 1} + K_{\omega 2})^{-1} T_B^{-1} T_I} = \boxed{1831.} \tag{4.48}$$

ZADACI ZA VJEŽBU:

■ Zadatak 4.1

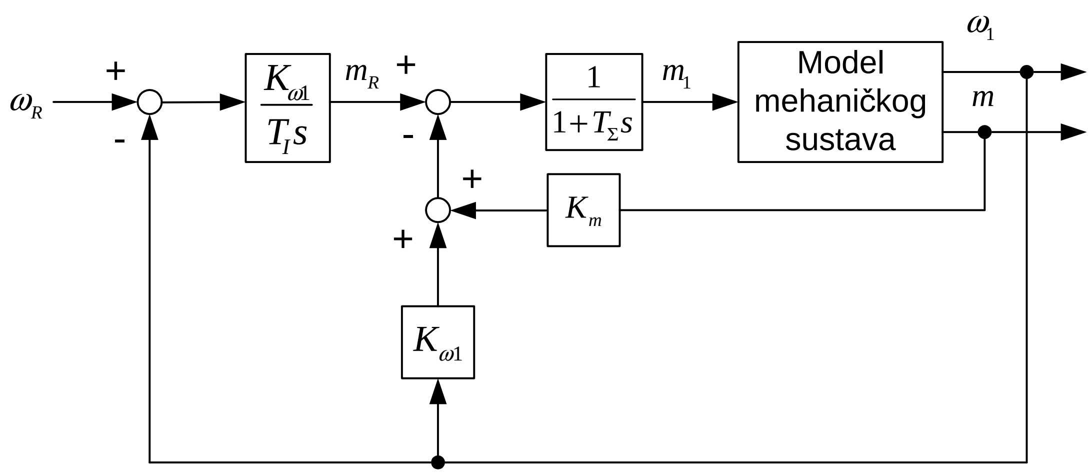
Za sustav na slici 4.3 zadani su sljedeći normirani parametri:

$T_{M1} = 1.0[s]$ *- motor;* $T_{M2} = 4.0[s]$ *- teret;*
$c = 100[Nm/rad]$ *- konstanta krutosti;*
$d = 0.5[Nms/rad]$ *- konstanta prigušenja;*
$T_B = 1[s]$ *- normirana vremenska konstanta*

Potrebno je nacrtati strukturnu blokovsku shemu nadomjesnog kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s PIm regulatorom brzine vrtnje te odrediti parametre regulatora uz korištenje optimuma dvostrukog odnosa ($D_i = 0.5$*), nadomjesnu vremensku konstantu podređenog regulacijskog kruga struje* $T_{ei} = 0.01\,[s]$ *i vrijeme uzorkovanja* $T = 0.001\,[s]$*.*

Napomena: *Nadomjesnu vremensku konstantu zatvorenog kruga odredite koristeći približnu relaciju.*

Rješenje:



Slika 4.6: Nadomjesna shema kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje dvomasenog elastičnog sustava s PIm regulatorom.

Parametri PIm regulatora brzine vrtnje po varijablama stanja iznose $T_I = 0.591[s]$, $K_{\omega 1} = 12.07$ te $K_m = -0.558$.

■ ZADATAK 4.2

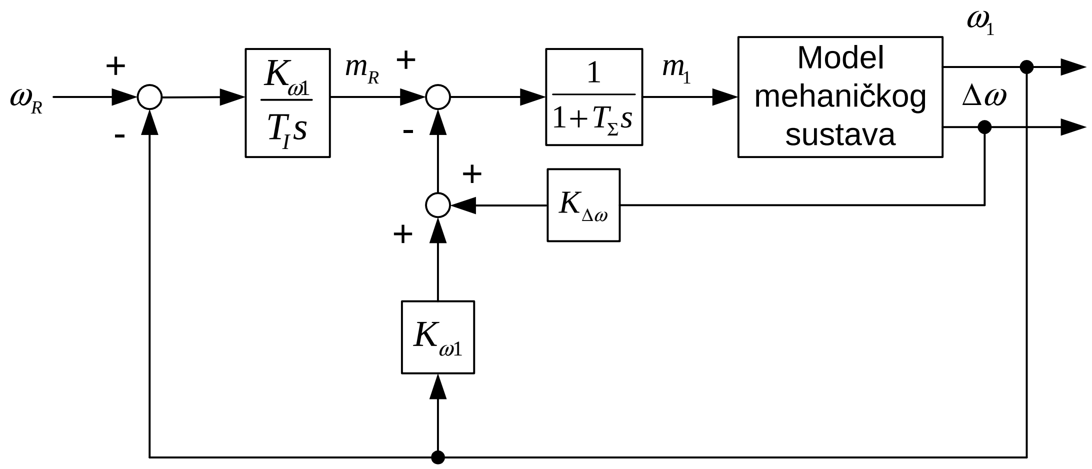
Za sustav na slici 4.3 zadani su sljedeći normirani parametri:

$$T_{M1} = 1.0[s] \text{ - } \textit{motor; } T_{M2} = 4.0[s] \text{ - } \textit{teret;}$$
$$c = 100[Nm/rad] \text{ - } \textit{konstanta krutosti;}$$
$$d = 0.5[Nms/rad] \text{ - } \textit{konstanta prigušenja;}$$
$$T_B = 1[s] \text{ - } \textit{normirana vremenska konstanta}$$

Potrebno je nacrtati strukturnu blokovsku shemu nadomjesnog kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje s $PI_{\Delta\omega}$ regulatorom brzine vrtnje te odrediti parametre regulatora uz korištenje optimuma dvostrukog odnosa ($D_i = 0.5$), nadomjesnu vremensku konstantu podređenog regulacijskog kruga struje $T_{ei} = 0.01\,[s]$ i vrijeme diskretizacije $T = 0.001\,[s]$.

Napomena: *Nadomjesnu vremensku konstantu zatvorenog kruga odredite koristeći približnu relaciju.*

RJEŠENJE:



Slika 4.7: Nadomjesna shema kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje dvomasenog elastičnog sustava s $PI_{\Delta\omega}$ regulatorom.

Parametri $PI_{\Delta\omega}$ regulatora brzine vrtnje po varijablama stanja iznose $T_I = 0.403[s]$, $K_{\omega 1} = 48.86$ te $K_{\Delta\omega} = -34.54$.