Rendszer és Irányítástechnika Házi Feladat

Kovács Hunor Ádám

P953MO

Paraméterek:

ϑ_0: $6[V]$; ϑ_1: $1251{,}64\left[\frac{V}{rad}\right]$; ϑ_2: $60[\circ]$; ϑ_3: $10[\%]$; ϑ_4: $10[\%]$; ϑ_5: $5[ms]$

MŰEGYETEM 1782

Tartalomjegyzék:

Motor Paraméterei

A megadott névleges feszültség $u_n = 6\ [V]\ (\vartheta_0)$, ez alapján a választott motor paraméterei:

Név	Jelölés	Katalógus Dimenzió	SI Egység
Armatúra ellenállás	R_a	$0{,}454\ [\Omega]$	$0{,}454\ [\Omega]$
Armatúra induktivitás	L_a	$0{,}06\ [mH]$	$6 \cdot 10^{-5} [H]$
Nyomatékállandó	k_m	$11{,}6\ \left[\frac{\mathrm{mNm}}{\mathrm{A}}\right]$	$1{,}16 \cdot 10^{-2} \left[\frac{Nm}{A}\right]$
Sebességállandó	k_s	$825\ \left[\frac{rpm}{V}\right]$	$86{,}394 \left[\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{sV}}\right]$
Forgórész tehetetlenségi nyomatéka	J_r	$44{,}2\ [gcm^2]$	$4{,}42 \cdot 10^{-6} [kgm^2]$
Névleges szögsebesség	ω_n	$3400\ [rpm]$	$356{,}047\ \left[\frac{rad}{s}\right]$
Névleges áramerősség	i_n	$44{,}5\ [mNm]$	$4{,}45 \cdot 10^{-2}\ [\mathrm{Nm}]$

táblázat 1: Paraméterek

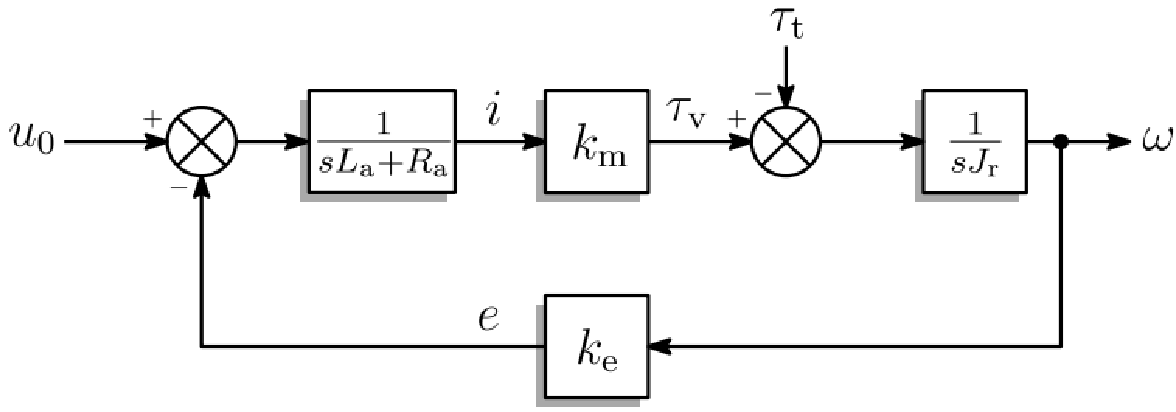
1. Feladat: Dinamikai modell

a) Feszültség – szögsebesség átviteli függvény

A hatásvázlatból kiolvasva a következő módon tudjuk felírni:

$$W_{\mathrm{u-\omega}}(\mathrm{s}) = \frac{W_v \cdot W_p}{1 + W_o} = \frac{W_v \cdot W_p}{1 + W_v \cdot W_p \cdot W_c} = \frac{\frac{1}{s \cdot L_a + R_a} \cdot k_m \frac{1}{s \cdot J_r}}{1 + \frac{1}{s \cdot L_a + R_a} \cdot k_m \frac{1}{s \cdot J_r} \cdot k_e} = \tag{1}$$

$$= \frac{k_m}{J_r \cdot L_a \cdot s^2 + J_r \cdot R_a \cdot s + k_m \cdot k_e} = \frac{116}{2{,}652 \cdot 10^{-6} \cdot s^2 + 0{,}0201 \cdot s + 1{,}3427}$$



ábra 1: A hatásvázlat

b) Állapottér modell

A motor, és így a rendszer két alapegyenlete:

$$u_0 = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_e \omega \tag{2}$$

És:

$$J_r \frac{d\omega}{dt} = k_m i - \tau_t \tag{3}$$

A két állapotváltozó deriváltjaira rendezve:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_a} u_0 - \frac{R_a}{L_a} i - \frac{k_e}{L_a} \omega \tag{4}$$

És:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{J_r} i - \frac{1}{J_r} \tau_t \tag{5}$$

Ez alapján az állapotváltozók szerint fel tudjuk írni az állapottér modellt paraméteresen,

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_e}{L_a} \\ \frac{k_m}{J_r} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0(t) \tag{6}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + 0 \cdot u_0(t) \tag{7}$$

És numerikusan:

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7566{,}7 & -192{,}9 \\ 2624{,}4 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1666{,}7 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0(t) \tag{8}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + 0 \cdot u_0(t) \tag{9}$$

c) Az időállandók és a statikus erősítés

A rendszer erősítése a végértéktétel alapján:

$$A = W_{U_0 \to \Omega_m}(s) \cdot s \cdot \frac{1}{s} = \frac{k_m}{J_r L_a s^2 + J_r R_a s + k_m k_e} = \frac{1}{k_e} = 86{,}394 \left[\frac{rad}{sV}\right] \tag{10}$$

Az átviteli függvény pólusai:

$$p(s) = L_a \cdot J_r \cdot s^2 + R_a \cdot J_r \cdot s + k_m k_e = (s + 7499{,}2)(s + 67{,}5) = 0 \tag{11}$$

A (11)-es egyenlet gyökei a pólusok, az időállandók pedig ezek inverzeinek (-1)-szeresei.

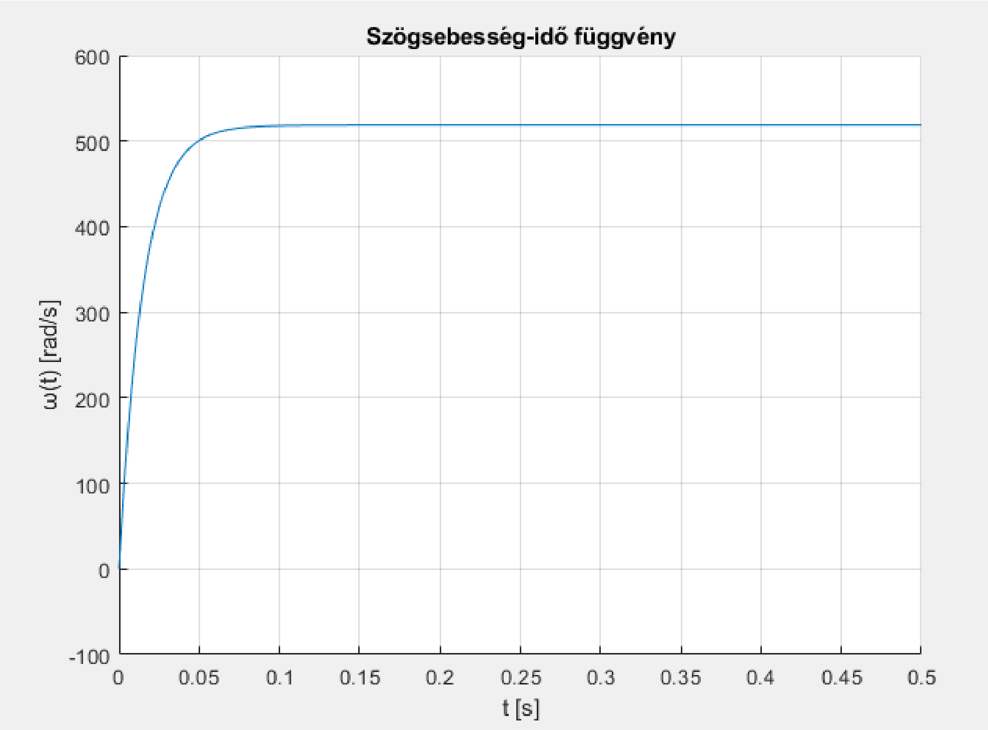
$$T_1 = 0{,}0148[s] \tag{12}$$

$$T_2 = 0{,}000133[s] \tag{13}$$

d) A szögsebesség időfüggvénye

Az a) feladatban meghatározott átviteli függvényt (1) parciális törtekre bontásával majd inverz Laplace-transzformálásával az alábbi szögsebesség-idő függvényt kapjuk meg:

$$\omega(t) = -523{,}07 \cdot e^{-67{,}51t} + 4{,}71 \cdot e^{-7499{,}2t} + 518{,}36 \cdot e^{0t} \tag{14}$$



ábra 2: A szögsebesség idő átviteli függvény

2. Feladat: PD pozíciószabályozás analízise

a) Felnyitott kör frekvenciaátviteli függvénye

A felnyitott kör frekvenciaátviteli függvényéhez PD szabályozóra és a szakasz átviteli függvényére lesz szükségünk.

Az ideális PD szabályozó:

$$W_c(s) = P \cdot (1 + T_D \cdot s) \tag{15}$$

A szabályozott szakasz átviteli függvénye:

$$W_p(s) = W(s) = \frac{k_m}{J_r L_a s^2 + J_r R_a s + k_m k_e} = \frac{k_m}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_2}\right) \cdot L_a \cdot J_r} \tag{16}$$

A felnyitott kör a (15) PD szabályozó és a (16) szabályozott kör átviteli függvényének szorzataként kapható meg:

$$W_o(s) = W_c(s) \cdot W_p(s) = P \cdot (1 + T_D \cdot s) \cdot \frac{k_m}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_2}\right) \cdot L_a \cdot J_r} \tag{17}$$

A pólus-zérus kiejtést alkalmazva, valamint $T_1 = T_D$ feltétel mellett:

$$W_o(s) = \frac{k_m \cdot P \cdot T_1}{\left(\frac{1}{T_2} + s\right) \cdot L_a \cdot J_r} \tag{18}$$

Ha az $s = j\omega$ formális behelyettesítést is végrehajtjuk, megkapjuk a felnyitott kör frekvenciaátviteli függvényének végleges alakját:

$$W_o(j\omega) = \frac{k_m \cdot P \cdot T_1}{\left(\frac{1}{T_2} + j\omega\right) \cdot L_a \cdot J_r} \tag{19}$$

b) Vágási körfrekvencia és fázistartalék

Az erősítés megadott érték: $P = \vartheta_1 = 1251{,}64\ \left[\frac{V}{rad}\right]$

A vágási körfrekvencia esetén a rendszer erősítése zérus, így:

$$|W_o(j\omega)| = \sqrt{\frac{(k_m P T_1)^2}{\left(\frac{L_a J_r}{T_2} + j\omega_c L_a J_r\right)^2}} = 1 \tag{20}$$

Az egyenletet átrendezve kijön a vágási körfrekvencia:

$$\omega_c = 27987\ \left[\frac{rad}{s}\right] \tag{21}$$

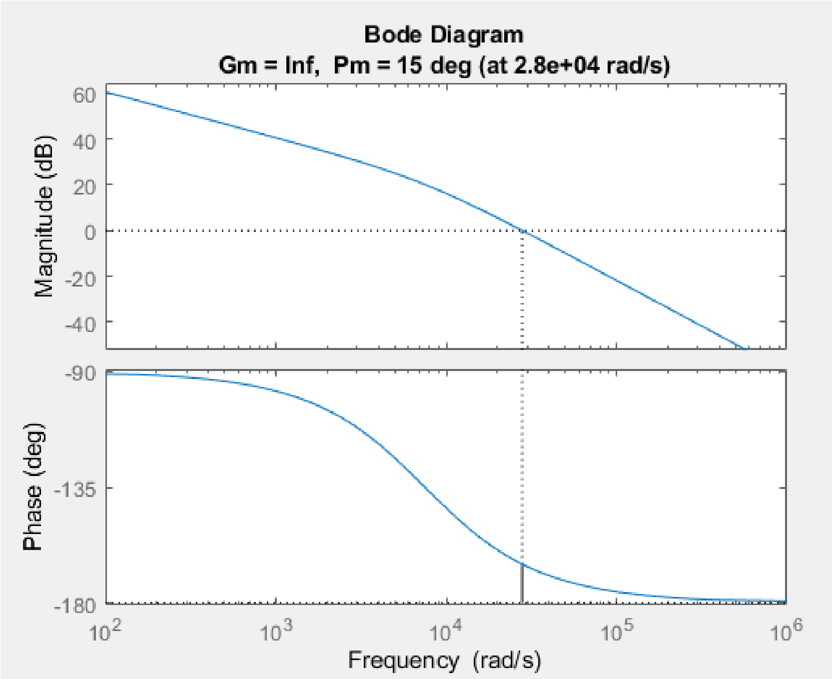
A fázistartalék az az érték, amivel fázisfüggvény vágási körfrekvenciánál felvett értéke 180°-ot ad.

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctan(T_2 \cdot \omega) \tag{22}$$

$$\varphi_t = \pi - \frac{\pi}{2} - \arctan(T_2 \cdot \omega) = 15\ [°] \tag{23}$$

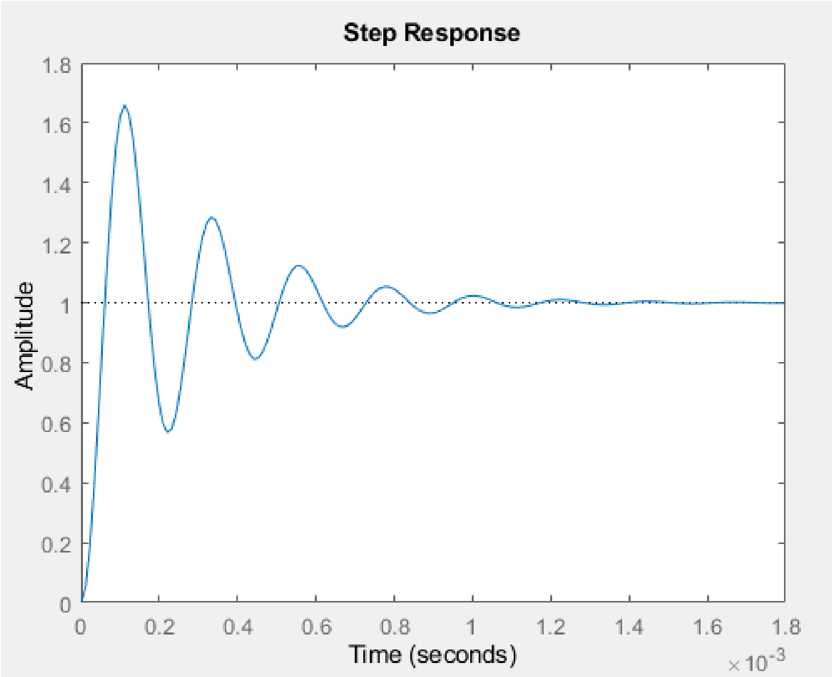
c) Felnyitott kör Bode-diagramja

A körfrekvencia, és a fázistartalék fekete vonallal jelölve a Bode-diagrammon:



ábra 3: Felnyitott kör Bode-diagramja

A zárt szabályozási lánc ugrásválasza:



ábra 4: Zárt szabályozási lánc ugrásválasza

3. Feladat: PI szabályozó tervezése

a) Zárt szabályozási lánc átviteli függvénye és karakterisztikus polinomja

A szakasz átviteli függvénye, időállandói már korábban kifejtve lettek a (12)-es, (13)-as és (16)-os egyenletekben.

A PI szabályozó átviteli függvénye:

$$W_c(s) = p \cdot \frac{1 + T_I \cdot s}{T_I \cdot s} \tag{24}$$

Ha a pólus-zérus kiejtést alkalmazzuk, és a $T_1 = T_I$ feltétel érvényesül, a nyitott lánc átviteli függvénye:

$$W_o(s) = W_c(s) \cdot W_p(s) = \frac{P \cdot k_m}{L_a \cdot J_r \cdot s\left(s + \frac{1}{T_2}\right)} \tag{25}$$

A zárt lánc átviteli függvénye pedig:

$$W_{cl}(s) = \frac{W_o(s)}{1 + W_o(s)} = \frac{1}{\frac{L_a \cdot J_r}{P \cdot k_m} \cdot s^2 + \frac{L_a \cdot J_r}{T_2 \cdot P \cdot k_m} \cdot s + 1} \tag{26}$$

És így a karakterisztikus polinom:

$$\tilde{p}(s) = \frac{L_a \cdot J_r}{P \cdot k_m} \cdot s^2 + \frac{L_a \cdot J_r}{T_2 \cdot P \cdot k_m} \cdot s + 1 = 0 \tag{27}$$

b) Zárt szabályozási lánc stabilitása

A zárt szabályozási lánc abban az esetben lesz stabil, ha a karakterisztikus polinom együtthatói nagyobbak mint 0. Jelen polinom esetén ez akkor fog bekövetkezni, ha *P* nagyobb mint 0, mivel az összes paraméter pozitív. Ezáltal $P_{min} = 0$.

c) A felnyitott kör frekvenciaátviteli függvénye

A (25)-ös számú egyenletben már meghatározásra került a nyitott lánc átviteli függvénye, már csak a $s = j\omega$ formális behelyettesítést még el kell végezni.

$$W_o(j\omega) = \frac{P \cdot k_m}{L_a \cdot J_r \cdot j\omega\left(j\omega + \frac{1}{T_2}\right)} \tag{28}$$

d) P erősítési tényező értéke $\vartheta_2 = 60$ [°] fázistartalék esetén

Fázismenet:

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - (T_2 \cdot \omega) \tag{29}$$

Fázistartalék:

$$\varphi_t = \pi - \varphi(\omega) = \pi - \frac{\pi}{2} - (T_2 \cdot \omega) \tag{30}$$

Ebből meghatározható a vágási körfrekvencia:

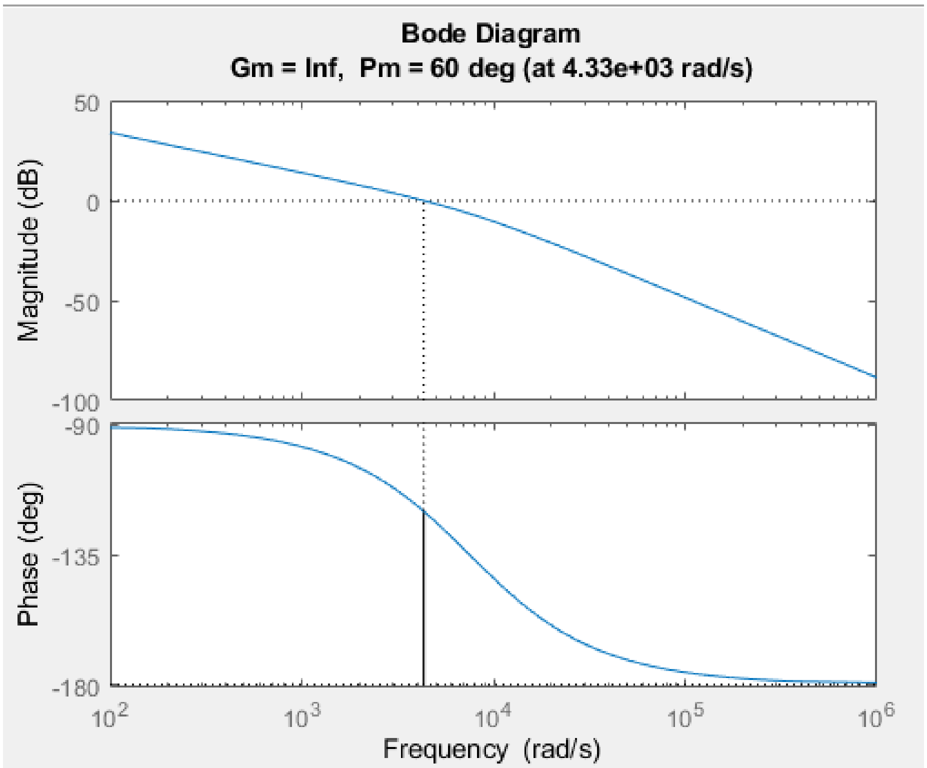
$$\omega_c = 4329{,}6 \left[\frac{rad}{s}\right] \tag{31}$$

A vágási frekvencia esetén a rendszer erősítése zérus, ezért a keresett erősítés értéke a következő módon határozható meg:

$$P = \frac{L_a \cdot J_r \cdot \sqrt{T_2^2 \cdot \omega_c^2 + \omega_c^2}}{k_m T_2} = 0{,}8571 \left[\frac{V}{rad}\right] \tag{32}$$

e) Felnyitott kör Bode-diagramja, zárt szabályozási lánc válasza névleges szögsebesség esetén

A felnyitott kör Bode-diagramja:

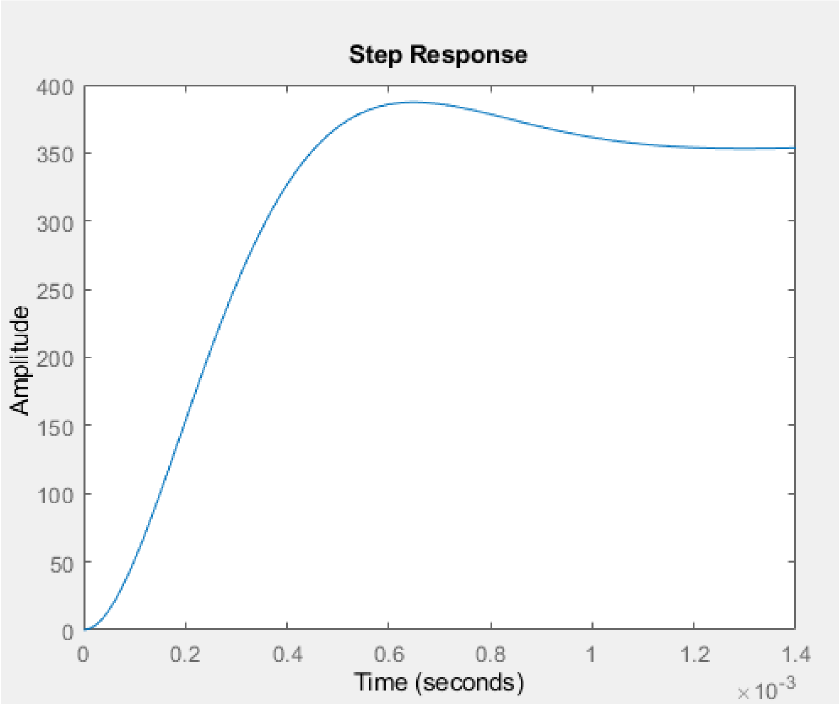


ábra 5: A felnyitott kör Bode-diagramja névleges szögsebességre.

A zárt lánc (26)-os átviteli függvénye alapján, a végértéktétellel a következőt kapjuk:

$$\omega(\infty) = s \cdot W_{cl} \cdot \omega_0 \cdot \frac{1}{s} = \omega_0 \cdot \frac{1}{\frac{L_a \cdot J_r}{P \cdot k_m} \cdot s^2 + \frac{L_a \cdot J_r}{T_2 \cdot P \cdot k_m} \cdot s + 1} = 356{,}047 \left[\frac{rad}{s}\right] \tag{33}$$

A zárt lánc válasza névleges szögsebesség rákapcsolása esetén:



ábra 6: Zárt lánc névleges szögsebesség válasza

4. Feladat: Állapotvisszacsatolás tervezése

a) Pólusallokációhoz használt pólusok

A pólusokat a túllövés és a beállási idő egyenleteiből tudjuk meghatározni. A két egyenletből a ζ valamint az ω_n értékeit kapjuk meg, a feladatban megadott adatok alapján: $\Delta\nu = \vartheta_3 = 10\%$ és $T_{\vartheta_4\%} = T_{10\%} = \vartheta_5 = 0{,}005\ [s]$.

A százalékos túllövés:

$$\Delta\nu = 10\% = 100 \cdot e^{-\frac{\zeta \cdot \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \tag{34}$$

Ez alapján ζ:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2 0{,}1}{\pi^2 + \ln^2 0{,}1}} = 0{,}5912\ [-] \tag{35}$$

A beállási idő:

$$T_{10\%} = 0{,}0015 = \frac{1}{\zeta \cdot \omega_n} \ln\left(\frac{100}{10}\right) \tag{36}$$

És így az ω_n:

$$\omega_n = \frac{1}{\zeta \cdot T_{10\%}} \ln 10 = 779{,}0123\ \left[\frac{rad}{s}\right] \tag{37}$$

Ezek alapján a pólusok:

$$p_{1,2} = -\zeta \cdot \omega_n \pm j \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2} = -460{,}517 \pm 628{,}319 \cdot i\ \left[\frac{rad}{s}\right] \tag{38}$$

b) A rendszer irányíthatósági kanonikus alakja

A rendszer állapottér modellje, melyet a (8)-as és (9)-es egyenletben írtunk le:

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7566{,}7 & -192{,}9 \\ 2624{,}4 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1666{,}7 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0(t) \tag{39}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + 0 \cdot u_0(t) \tag{40}$$

Az irányíthatósági mátrix egy két állapotváltozóval rendelkező rendszerre, és invertáltja:

$$\boldsymbol{M_c} = [\boldsymbol{B}|\boldsymbol{AB}] = \begin{bmatrix} 1666{,}7 & -1{,}2611 \cdot 10^8 \\ 0 & 4{,}3741 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \tag{41}$$

$$\boldsymbol{M_c^{-1}} = \begin{bmatrix} 6 \cdot 10^{-5} & 1{,}7299 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 2{,}2862 \cdot 10^{-8} \end{bmatrix} \tag{42}$$

Ezek után az $\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{c}}$ mátrixot fejezzük ki, melyhez az irányíthatósági kanonikus alak mátrixaira van szükségünk, melyek a megfigyelhetőségi mátrixok transzponáltjaival egyenlők.

$$\boldsymbol{A_c} = \boldsymbol{A^T} = \begin{bmatrix} -7566{,}7 & 2624{,}4 \\ -129.9 & 0 \end{bmatrix} \tag{43}$$

$$\boldsymbol{B_c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{44}$$

Így már meg tudjuk határozni az irányíthatósági mátrixot:

$$\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{c}} = [\boldsymbol{B_c} | \boldsymbol{A_c B_c}] \tag{45}$$

És így már meg tudjuk határozni a transzformációs mátrixot:

$$\boldsymbol{T} = \widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{c}} \cdot \boldsymbol{M_c^{-1}} = \begin{bmatrix} 0 & 2{,}286 \cdot 10^{-8} \\ 6 \cdot 10^{-5} & 0 \end{bmatrix} \tag{46}$$

A $\boldsymbol{C_c}$ mátrixot a transzformációs mátrix segítségével a következő képpen tudjuk meghatározni:

$$\boldsymbol{C_c} = \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{T^{-1}} = \begin{bmatrix} 4{,}3741 \cdot 10^7 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{47}$$

Így a rendszer irányíthatósági kanonikus alakja:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7566{,}7 & -192{,}9 \\ 2624{,}4 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1666{,}7 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0(t) \tag{48}$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + 0 \cdot u_0(t) \tag{49}$$

c) K mátrix és ellenőrzése

A szabályozó $\boldsymbol{K}$ mátrixának meghatározásához először a 4. a) feladatrészben meghatározott pólusokból kell létrehozni az $\widetilde{\boldsymbol{A}}$ mátrixot.

$$\tilde{p}(s) = (s - p_1) \cdot (s - p_2) = s^2 - 921{,}034 \cdot s - 6{,}069 \cdot 10^5$$

$$\widetilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} 0 & a_2 \\ a_0 & a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6{,}069 \cdot 10^5 & -921{,}034 \end{bmatrix} \tag{50}$$

Az irányíthatósági kanonikus alak mátrixokkal meghatározható a $\boldsymbol{K_c}$ mátrix:

$$\widetilde{\boldsymbol{A}} = \boldsymbol{A_c} - \boldsymbol{B_c} \cdot \boldsymbol{K_c} \tag{51}$$

$$\boldsymbol{K_c} = [1{,}001 \cdot 10^5 \quad -6645{,}6] \tag{52}$$

A transzformációs mátrix segítségével pedig vissza tudjuk transzformálni a mátrixot az eredeti állapottérbe.

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{K_c} \cdot \boldsymbol{T} = [-0{,}3987 \quad 0{,}00023] \tag{53}$$

Ezt a MATLAB segítségével az Ackermann-formulával is le tudjuk ellenőrizni, a következő képpen:

K=acker(A, B, [p_1 p_2])

kódrésszel, ahol A és B az eredeti állapottér mátrixait, valamint a két pólust használjuk fel.

Az eredmény:

```
K =

   -0.3987    0.0023
```

ábra 7: Ackermann ellenőrzés eredménye

Amint látjuk a két érték megegyezik, így az ellenőrzés sikeres volt.

d) Visszacsatolástól függő- és független alapjelkompenzáció

A statikus alapjelkompenzációhoz szükséges $\boldsymbol{K_r}$ a következő módon adódik:

$$\boldsymbol{K_r} = -\left(\boldsymbol{C_c} \cdot \widetilde{\boldsymbol{A}}^{-\mathbf{1}} \cdot \boldsymbol{B_c^T}\right)^{-1} = 0.0139 \tag{54}$$

Dinamikus alapjelkompenzáció esetén $\boldsymbol{K_{rx}}$ és $\boldsymbol{K_{ru}}$ értékét az alábbi módszerrel számoljuk:

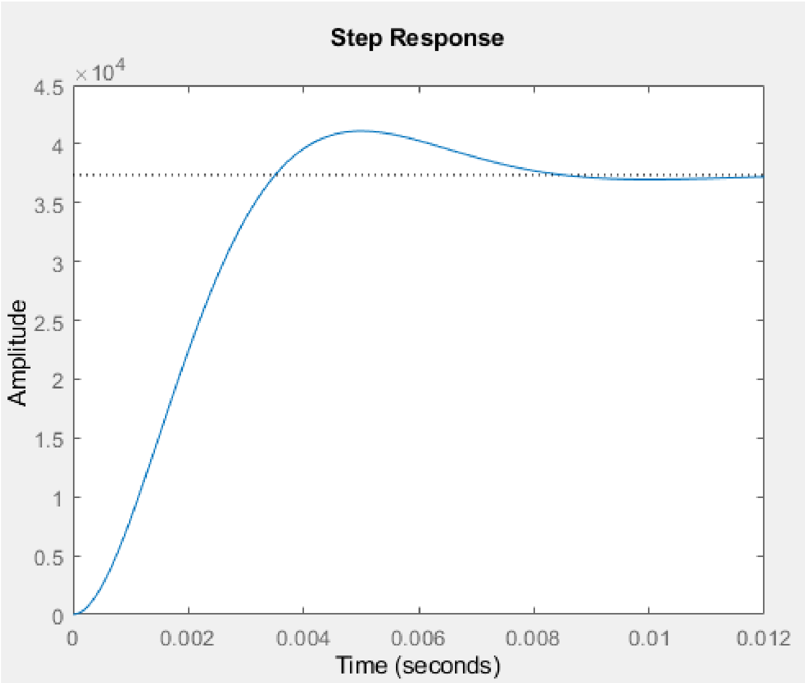
$$[\boldsymbol{K_{rx}}\ \boldsymbol{K_{ru}}\,] = [\boldsymbol{A}\ \boldsymbol{B}\ \boldsymbol{C}\ \mathbf{0}\,]^{-\mathbf{1}} \cdot [0\ \boldsymbol{I}\,]$$

Ebből kiszámolva a két mátrixot:

$$\boldsymbol{K_{rx}} = [0 \quad 1] \tag{55}$$

$$K_{ru} = 0{,}0116 \tag{56}$$

e) Zárt szabályozási kör ugrásválasza



ábra 8: Zárt szabályozási kör ugrásválasza

Melléklet:

MATLAB kód:

```
clc
clear


R_a=0.454;
L_a=0.00006;
k_m=0.0116;
k_s = 86.394;
k_e=1/k_s;
J_r=0.00000442;
w_n=356.047;
i_n=0.0445;
teta_0=6;
teta_1=1251.64;
teta_2=60;
teta_3=10;
teta_4=10;
teta_5=5;

s=tf('s');

%1. feladat
A=[-R_a/L_a -k_e/L_a;k_m/J_r 0];
B=[1/L_a;0];
C=[0 1];
D=[0];
H_ss=ss(A,B,C,D);
H=tf(H_ss);
w=pole(H_ss);
T12=-1./w;
T12=sort(T12,'descend');
A_r=1/k_e;
U_s=teta_0/s;
omega_s=zpk(H*U_s);
[zero,k]=zero(omega_s);
p=pole(omega_s);

g_1=k/((p(1)+-p(2))*(p(1)+-p(3)));
g_2=k/((p(2)+-p(1))*(p(2)+-p(3)));
g_3=k/((p(3)+-p(2))*(p(3)+-p(1)));
figure;
hold on
fplot(@(t) g_1*exp(p(1)*t)+g_2*exp(p(2)*t)+g_3*exp(p(3)*t),[0 0.5]);
title('Szögsebesség-idő függvény');
xlabel('t [s]');
ylabel('ω(t) [rad/s]');
grid on;

%2. feladat
P=teta_1;
n=0.1;
H_2=P*k_m*T12(1)/(s*(s+1/T12(2))*L_a*J_r);
[gm,phi_m,wcg,w_c] = margin(H_2);
```

```
figure;
hold on;
margin(H_2);
figure;
hold on;
H_3=minreal(H_2/(1+H_2));
step(H_3);

%3. feladat
syms P_2 w_c2;
P_min=0;
T_1_T_2=T12(1)*T12(2);
Phi_t=deg2rad(teta_2);
w_c2=double(solve(Phi_t==pi/2-atan(w_c2*T12(2)),w_c2));
P_2=double(solve(1==abs((P_2*k_m/L_a/J_r)/(1i*w_c2*(1i*w_c2+1/T12(2)))),P_2));
H_4= (P_2*k_m/L_a/J_r)/(s*(s+1/T12(2)));
figure;
hold on;
margin(H_4);
H_5=minreal(H_4/(1+H_4)*w_n/s);
figure;
hold on;
step(H_5*s);
y_inf=H_5.Numerator{1,1}(1,4)/H_5.Denominator{1,1}(1,3);

%4. feladat
dv=teta_3/100;
t_pct=teta_5/1000;
pct=teta_4;
syms beta w_d;
beta=double(solve(t_pct==1/beta*log(100/pct),beta));
w_d=double(solve(dv==exp(-beta*pi/w_d),w_d));
p_1=-beta+w_d*1i;
p_2=-beta-w_d*1i;

zeta=-real(p_1)/abs(p_1);
w_n=beta/zeta;

A_c=[0 1; -k_m*k_e/(L_a*J_r) -R_a/L_a];
B_c=[0;1];
C_c=[k_m/L_a/J_r 0];
D_c=[0];

H_ss2=ss(A_c,B_c,C_c,D_c);
syms s K_c
alfa_s=sym2poly((s-p_1)*(s-p_2));
A_tau=[0 alfa_s(1);-alfa_s(3) -alfa_s(2)];
K_c=(A_c-A_tau);
K_c=[K_c(2,1) K_c(2,2)];
M_c=[H_ss.B H_ss.A*H_ss.B];
M_cI=M_c^-1;
M_ctau=[B_c A_c*B_c];
T=M_ctau*M_c^-1;
K1=K_c*T;
K=acker(H_ss.A, H_ss.B, [p_1 p_2]);

K_r=-(C_c*A_tau^-1*B_c)^-1;
HipM_1=[H_ss.A H_ss.B;H_ss.C 0];
HipM_2=[0;0;1];
```

```
Krxu=HipM_1\HipM_2;
Krx=[Krxu(1);Krxu(2)];
Kru=Krxu(3);
s=tf('s');
u_n=teta_0;
omega_0=u_n/k_e;

figure;
hold on;
step(A_tau,B_c*omega_0,C_c,0);
```