

Egyenáramú motor kaszkád szabályozása

1. A gyakorlat célja

Az egyenáramú motor modellje alapján kaszkád szabályozó tervezése. A szabályozási kör felépítése Simulink környezetben. A szimulációs eredmények feldolgozása.

2. Elméleti bevezető

Ha az irányítás folyamat fokszáma nagy, az irányítást megvalósító szabályozó is bonyolult struktúrájú lesz. Ha a folyamat sok pólust tartalmaz, a pólus-zérus kiejtést alkalmazó szabályozó sok zérust kell tartalmazzon, a szabályozó elveszítheti kauzalitását. Ilyen esetekben használhatjuk a kaszkád szabályozás elvét: a folyamatot felosztjuk több, egymással sorba levő részfolyamatra és az összes részfolyamatra szabályozót tervezünk. Az egyenáramú motorral végzett pozíciószabályozás esetén a szabályozó tervezéséhez a motor dinamikus modelljéből indulhatunk ki. A motor dinamikáját leíró egyenletek:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} + i \cdot R = U - c_1 \cdot \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} + F_v \cdot \omega = c_2 \cdot i - \tau_{ext} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (1)$$

A folyamat bemenete a rotorra adott feszültség (U), kimenete a rotor szögpozíciója (α). A motor belső állapotai a rotor szögsebessége (ω) és a rotoron átfolyó áram (i). τ_{ext} a motorra ható külső nyomatékot jelöli, vagyis azt a nyomatékot, amivel a mozgatott tárgy visszahat a motorra. A motor viselkedését leíró (1) rendszer első egyenlete a rotor elektromos, a második egyenlet a rotor mechanikus viselkedését írja le. A harmadik egyenletben a szögpozíció változás egyenlő a szögsebességgel. A paraméterek:

R – a rotor ellenállása

L – a rotor induktivitása

c_1 – a rotor sebességállandójának inverze

J – a rotor inerciája

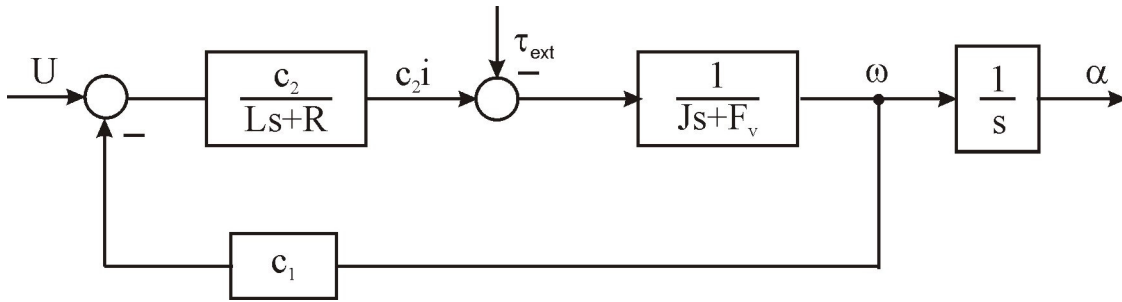
c_2 – a nyomatékállandó

F_v – a viszkózus súrlódási együttható a rotor felfüggesztésénél megjelenő súrlódás miatt.

A (1) egyenletekre alkalmazva a Laplace transzformáltat, kapjuk:

$$\begin{cases} \frac{i(s)}{U(s) - c_1 \cdot \omega(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R} \\ \frac{\omega(s)}{c_2 \cdot i(s) - \tau_{ext}(s)} = \frac{1}{J \cdot s + F_v} \\ \frac{\alpha(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{s} \end{cases} \quad (2)$$

Az 1 Ábrán a motor (2) összefüggés alapján felrajzolt tömbvázlata látható.



1 Ábra: Egyenáramú motor tömbvázlata

A pozíciósabályozási feladat megvalósításához a kaszkád szabályozási struktúrát alkalmazzuk. Habár a cél a szögpozíció előírt értékre történő szabályozása, az irányítás tervezésénél figyelembe vesszük a motor áramát és szögsebességét is. Az irányításnak teljesítenie kell a szervoszabályozási követelményeket (zérus állandósult állapotbeli pozícióhiba, gyors, túllövés-mentes válasz, érzéketlenség külső zajokra, terhelésváltozásra).

2.1 A belső áramszabályozási hurok

Főleg nagy elektromos időállandójú (nagy L/R érték) motoroknál célszerű kialakítani az áramszabályozási hurkot. A belső áramszabályozás célja a rendszer gyorsítása. Ezt egy, a visszacsatolásban elhelyezett P szabályozóval megvalósíthatjuk. Legyen a P szabályozó erősítése K_i . Képezzük úgy a beavatkozó jelet, hogy tartalmazza a külső hurok beavatkozó jelét és a K_i erősítőn keresztül kialakított áram visszacsatolást:

$$U = u - K_i i \quad (3)$$

A (3) beavatkozó jelet alkalmazva a belső, áramszabályozási hurkot, mint zárt rendszert az alábbi modell írja le:

$$H_i(s) = \frac{i(s)}{u - c_1 \omega(s)} = \frac{\frac{1}{L \cdot s + R}}{1 + K_i \cdot \frac{1}{L \cdot s + R}} \cdot c_2 = \frac{c_2}{L \cdot s + R + K_i} = \frac{\frac{c_2}{R + K_i}}{\frac{L}{R + K_i} s + 1} \quad (4)$$

A nem szabályozott ($K_i=0$), nyílt rendszer ($\frac{c_2}{L \cdot s + R}$) időállandója L/R , erősítése c_2/R . A visszacsatolás kialakításával látható, hogy a szabályozott rendszer időállandója ($\frac{L}{R+K_i}$) kisebb lesz, bármely $K_i > 0$ értékre, tehát a belső hurok gyorsabb, mint a nem szabályozott rendszer. Ugyanakkor a szabályozott rendszer erősítése ($\frac{c_2}{R+K_i}$) is kisebb, az u külső beavatkozó jel változásánál kisebb áramugrásokra számíthatunk. Tehát célszerű a K_i értéket minél nagyobbra választani. Az erősítés növelésének határt szab a motort vezérlő áramkör. Impulzusszélesség modulációt alkalmazva a motor beavatkozó jelének változtatásához, a belső hurok időállandója nagyobb kell legyen, mint a modulált jel periódusa. Mivel az áramszabályozó csak egy erősítőt tartalmaz, akár elektronikus áramkörrel (műveleti erősítővel) is megvalósítható.

A külső sebesség és pozíciószabályozási hurok tervezése

A külső hurok irányítási algoritmusának az alábbi követelményeket kell megvalósítania:

- egységugrásra nulla állandósult állapotbeli hiba
- 0% túllövés
- gyors válasz
- külső zajok, bemenetre ható terhelés hatásának elnyomása
- nem modellezett, a mechanikai rész rugalmas alakváltozásai miatt fellépő, mechanikai rezgések elkerülése

A követelmények teljesítéséhez a referenciamodell alapú tervezést alkalmazzuk. Legyen a referenciarendszer (előírt mintarendszer):

$$H_{0ref}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

A referencia rendszer erősítése 1, tehát egységugrásra nulla állandósult állapotbeli hibát biztosít.

Közismert, hogy ha a ξ csillapítás értéke 1-nél nagyobb, a rendszer válasza aperiodikus, tehát nem tartalmaz túllövést. Ugyanakkor a leggyorsabb aperiodikus választ $\xi=1$ értékre érjük el. Tehát a ξ paraméter értéke 1-nél nagyobb, de 1-hez közeli kell legyen.

Legyen a motorral meghajtott mechanikai rendszer sajátrezgéseinek frekvenciája ω_M . Ahhoz, hogy a szabályozó által kiszámított beavatkozó jel ne gerjessze a mechanikai rész rezgéseit, a referenciamodell ω_n saját frekvenciáját $\omega_n \leq 0.5 \cdot \omega_{0M}$ összefüggés alapján kell megválasztani.

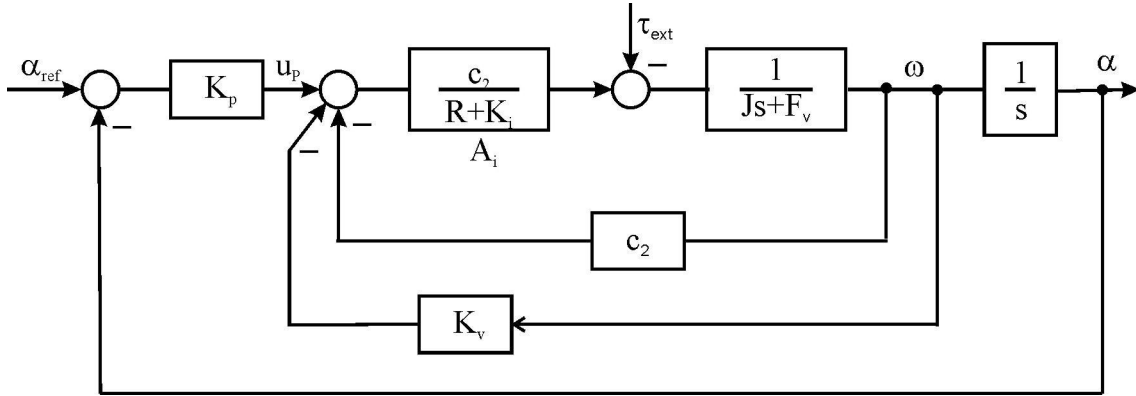
A jó zajelnyomás biztosítására a szabályozónak minél nagyobb erősítést kell választani. Számítsuk a külső szabályozási hurok beavatkozó jelét az alábbi formában:

$$u = K_p (\alpha_{ref} - \alpha) - K_v \cdot \omega \quad (6)$$

A belső áramszabályozási hurok időállandója nagy K_i értékek esetén elhanyagolható a külső hurok időállandói mellett ($\frac{L}{R+K_i} \cong 0$). A belső áramszabályozási hurok ideális erősítővel approximálható:

$$A_i = \frac{c_2}{R+K_i} \quad (7)$$

A visszacsatolt külső hurok tömbvázlata a 2. Ábrán látható.



2. Ábra: Külső sebesség és pozíciószabályozási hurok

A 2. Ábra alapján a belső sebesség szabályozási hurok átviteli függvénye:

$$H_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{u_p(s)} = \frac{\frac{A_i}{J \cdot s + F_v}}{1 + \frac{A_i(c_2 + K_v)}{J \cdot s + F_v}} = \frac{A_i}{J \cdot s + F_v + A_i(c_2 + K_v)} \quad (8)$$

A teljes szabályozási kör átvitelét leíró modell:

$$H_o(s) = \frac{\alpha(s)}{\alpha_{ref}(s)} = \frac{\frac{K_p}{s} \cdot \frac{A_i}{J \cdot s + F_v + A_i(c_2 + K_v)}}{1 + \frac{K_p}{s} \cdot \frac{A_i}{J \cdot s + F_v + A_i(c_2 + K_v)}} = \frac{K_p \cdot A_i}{J \cdot s^2 + (F_v + A_i(c_2 + K_v)) \cdot s + K_p \cdot A_i}$$

$$H_o(s) = \frac{\frac{K_p \cdot A_i}{J}}{s^2 + \frac{(F_v + A_i(c_2 + K_v)) \cdot s + K_p \cdot A_i}{J}} \quad (9)$$

Mivel a zárt rendszer modellje meg kell feleljen a referenciarendszer modelljének ($H_o(s) = H_{o_{ref}}(s)$), a (5) és (9) összefüggések alapján kapjuk:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_p \cdot A_i}{J} \\ 2\xi\omega_n = \frac{F_v + A_i(c_2 + K_v)}{J} \end{cases} \quad (10)$$

A (10) összefüggés alapján kapjuk az irányítási algoritmus paramétereit.

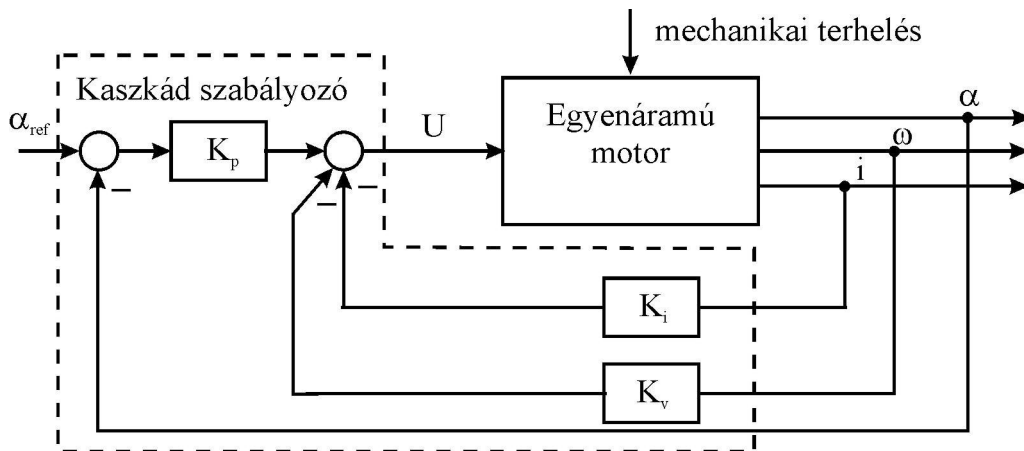
$$\begin{cases} K_p = \frac{J \cdot \omega_n^2}{A_i} \left(\leq \frac{J}{A_i} \cdot (0.5 \cdot \omega_{0M})^2 \right) \\ K_v = \frac{2\xi\omega_n J - F_v}{A_i} - c_2 \end{cases} \quad (11)$$

Látszik, hogy a K_p erősítés értéke nem lehet tetszőlegesen nagy, mivel ez gerjesztené a mechanikai rendszer sajátfrekvenciáját. Amennyiben a proporcionális zajelnyomás nem elégséges a kaskád szabályozónak a pozícióhibát figyelembe vevő ágában, a proporcionális tag mellé integráló tagot kell elhelyezni és ezt is figyelembe kell venni a tervezésnél.

A (6) és (3) összefüggések alapján következik az irányítás végső formája:

$$U = K_p(\alpha_{ref} - \alpha) - K_v \cdot \omega - K_i i \quad (12)$$

A kapott irányítási algoritmus a kaskád szabályozás elvét kihasználva teljesíti az előírt követelményeket, ugyanakkor nagyon egyszerű struktúrájú. Nem tartalmaz dinamikus (integráló, deriváló) elemeket, megvalósítása akár analóg, akár mintavételes módon egyszerű. Mivel csak három erősítéssparamétert tartalmaz, már működés közben is könnyen finom hangolható.



3 Ábra: Egyenáramú motor kaskád szabályozása

3. A mérés menete

Legyen egy egyenáramú motor az alábbi paraméterekkel:

$$R=7.13 \Omega$$

$$L=1.05 \text{ mH}$$

$$c_1=1/26.6 \text{ V/rad/sec}$$

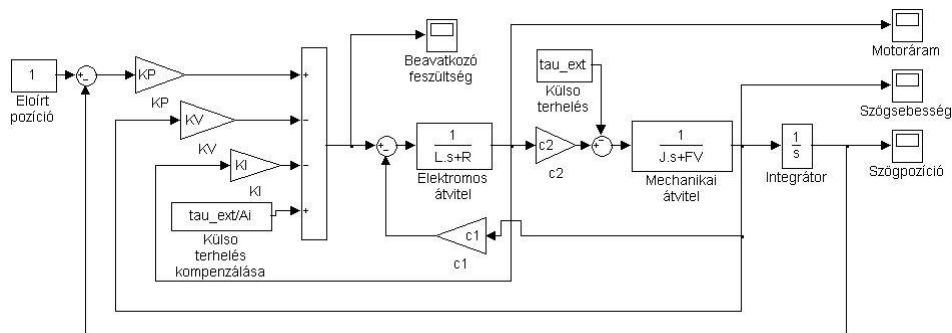
$$c_2=0.0382 \text{ Nm/A}$$

$$J=0.0001 \text{ Nm}^2$$

$$F_V=0.001795 \text{ Nm/rad/sec.}$$

Feladatok:

- Tervezzünk a motornak kaskád szabályozót pozíciószabályozásra, amely nulla túllövést biztosít, a zárt rendszer saját körfrekvenciája $\omega_n=10 \text{ rad/sec}$ és $\tau_{ext}=0.01 \text{ Nm}$ külső terhelés mellett nulla az állandósult állapotbeli hiba. Mivel a zárt rendszer egységugrásra adott válasza aperiodikus kell legyen, a ξ csillapítás értékét a (5) mintarendszerben egynél nagyobbra kell választani. A minél gyorsabb válasz biztosításához válaszunk a csillapítás értékét $\xi=1.1$ -nek. Írjuk fel az előírt mintarendszer átviteli függvényét
- Határozzuk meg a K_I erősítést a (4) összefüggés alapján úgy, hogy az áramszabályozási hurok válasza kétszer olyan gyors legyen, mint az eredeti rendszeré.
- Határozzuk meg a szabályozó K_P és K_V paramétereit a (11) összefüggés alapján számíthatjuk.
- A konstans külső terhelés kompenzálására bővítsük ki a (12) beavatkozó jelet egy extra kompenzáló taggal. Ahhoz, hogy a külső terhelés hatását ki tudjuk ejteni, az U értékét additív taggal kell bővíteni: $U := U + \tau_{ext} / A_i$.
- Építsük fel a 4 Ábrán látható szimulációs modellt:



4 Ábra: Egyenáramú szervomotor kaskád szabályozásának Simulink diagramja

- Vizsgáljuk meg hogy a rendszer válasza (pozíció kimenet) egyezik-e a referencia modell válaszával.

4. Kérdések és feladatok

1. Vizsgáljuk meg a rendszer válaszát $K_I=0$ értékkel. Hasonlítsuk össze az eredeti rendszer válaszokat az így kapott válaszokkal.
2. Vizsgáljuk meg a rendszer válaszát a τ_{ext} / A_i beavatkozó jel kibővítés nélkül. Mekkora az állandósult állapotbeli hiba.
3. Milyen tagot kellene elhelyezni a szabályozóba ahhoz, hogy ismeretlen külső terhelést kompenzáljunk?