

8. Gyors folyamatok szabályozása

Gyors szabályozási rendszerekről akkor beszélünk, ha az irányított folyamat időállandói másodperc, vagy az alatti nagyságrendűek. A gyors folyamatok esetében a holtidő általában az irányítási algoritmus megvalósításánál alkalmazott mintavételi periódushoz képest elhanyagolható. A mintavételi periódust kisebbnek kell választani, mint az irányított folyamat legkisebb időállandóját, általában tizedmásodperc, sőt ezredmásodperc (milliszekundum) nagyságrendűre.

Tipikusan gyors irányítási feladatok körébe tartoznak a *szervo szabályozások*, a szervomechanizmusok szabályozása. Ezek olyan szabályozási körök, amelyekben a beavatkozó kis időállandókkal rendelkező villamos vagy pneumatikus motor, és pozíció és/vagy sebességérzékelőt tartalmaz. A motor általában mechanikai pozicionáló berendezést, robotkart hajt meg. A cél a mechanikai rendszer pozíciójának előírt értékre történő szabályozása. A legfontosabb szabályozási követelmények szervoszabályozások esetén:

- Kis, az alkalmazott érzékelő felbontásával megegyező nagyságrendű, állandósult állapotbeli hiba.
- Gyors, általában túllövés-mentes válasz.
- A szabályozás érzéketlensége külső zajokra, külső terhelésre (például a mozgatott tárgy tömegére).

Pozíciószabályozás esetén az irányított folyamat tartalmaz integrátort (a pozíció a sebesség integrálja), tehát egységugrás-szerű alapjelre a szabályozás garantálja a nulla állandósult állapotbeli hibát. Ugyanakkor ahhoz, hogy a bemeneti zajokra (külső terhelésre) a szabályozás érzéketlen legyen a szabályozó is kell tartalmazzon integrátort vagy nagy erősítéssel kell, hogy rendelkezzen.

Az alábbiakban bemutatott szabályozótervezési eljárások (kaszád szabályozás, előrecsatolás, két szabadságfokú szabályozó, véges beállású szabályozás) általános rendszerekre kidolgozott módszerek, de a gyakorlat azt mutatja, hogy gyors folyamatok irányítása esetén alkalmazhatóak hatékonyan.

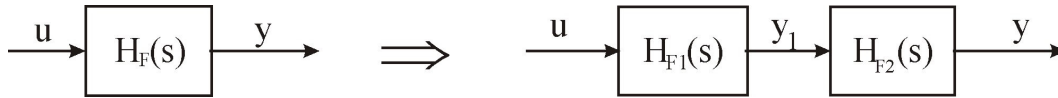
8.1. Kaszád szabályozási struktúrák

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 kaszád szabályozás elvét: a folyamatot felosztjuk több, egymással sorba levő részfolyamatra és az összes részfolyamatra szabályozót tervezünk.

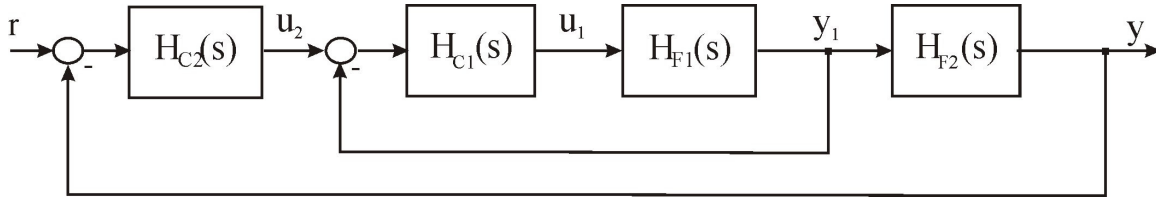
Példa a kaszád szabályozás elvének alkalmazására:

A 8.1 Ábrán a $H_F(s)$ irányított folyamatot két részfolyamatra osztjuk fel: $H_{F1}(s)$, $H_{F2}(s)$. A kaszád szabályozás megvalósításához először szabályozót tervezünk a $H_{F1}(s)$ modellel leírt rendszernek. Legyen ez a $H_{C1}(s)$. Jelölje $H_{O1}(s)$ a visszacsatolt $H_{F1}(s)$ és $H_{C1}(s)$ -ből álló szabályozási rendszert. Ez képezi a belső hurkot kaszád szabályozási körben. A külső hurokban a szabályozót ($H_{C1}(s)$) már a $H_{O1}(s)$ és $H_{F2}(s)$ által képezett sorba csatolt

rendszerekre tervezzük. A külső hurok által kiszámított beavatkozó jel (u_2) a belső hurok alapjele lesz (lásd 8.2 Ábra).



8.1 Ábra: a folyamat részfolyamatokra bontása kaszkád szabályozáshoz



8.2 Ábra: Kétszintű kaszkád szabályozási struktúra

Ha a folyamatot kettőnél több részfolyamatra bontjuk a szabályozónak is több tagja lesz. A többszintű visszacsatolás segítségével a szabályozási feladatot is feloszthatjuk. Például a belső hurokkal növelhetjük a szabályozás gyorsaságát, míg a külső hurokban elhelyezett szabályozó biztosítja a szabályozás pontosságát. A többszintű visszacsatolással a szabályozás robusztussága is növelhető.

A módszer hátránya, hogy az összes részfolyamat kimenetét kell mérni, a szabályozási kör megvalósítása bonyolultabb, több érzékelőt kell alkalmazni.

A kaszkád szabályozó kialakításánál törekedni kell arra, hogy a belső szabályozási hurok mindig gyorsabbak legyenek, mint a külsők. Így például belső hurokban alkalmazhatunk nagy erősítésű P, PD szabályozót a külső hurokban alkalmazhatunk PI vagy PID szabályozót.

8.1.1. Egyenáramú motor kaszkád szabályozása

Az egyenáramú motorral végzett pozíciósabályozás esetén a szabályozó tervezéséhez a motor dinamikus modelljéből indulhatunk ki. A motor dinamikáját leíró egyenletek:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + i \cdot R = U - c_1 \cdot \omega \\ J \frac{d\omega}{dt} + F_v \cdot \omega = c_2 \cdot i - \tau_{ext} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (8.1)$$

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 (8.1) 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 inercíája

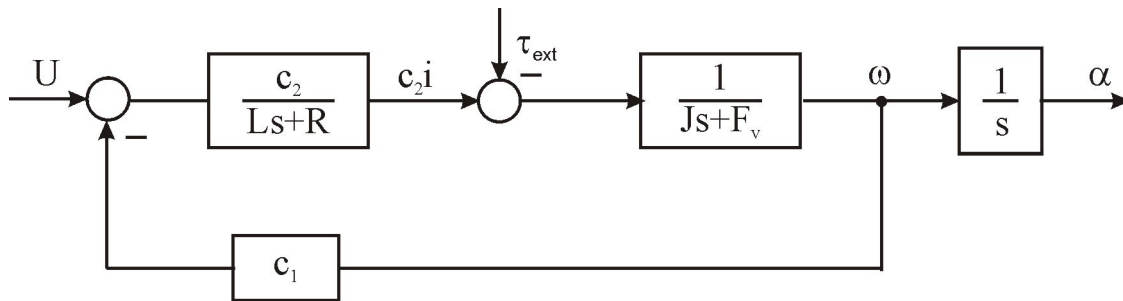
c_2 – a nyomatékállandó

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

A (8.1) egyenletekre alkalmazva a Laplace transzformáltat, kapjuk:

$$\begin{cases} \frac{i(s)}{U(s) - c_1 \cdot \omega(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R} \\ \frac{\omega(s)}{c_2 \cdot i(s) - \tau_{ext}(s)} = \frac{1}{J \cdot s + F_v} \\ \frac{\alpha(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{s} \end{cases} \quad (8.2)$$

A 8.3 Ábrán a motor (8.2) összefüggés alapján felrajzolt tömbvázlata látható.



8.3 Ábra: Egyenáramú motor tömbvázlata

A pozíciószabályozási 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).

8.1.1.1.A belső áramszabályozási hurok

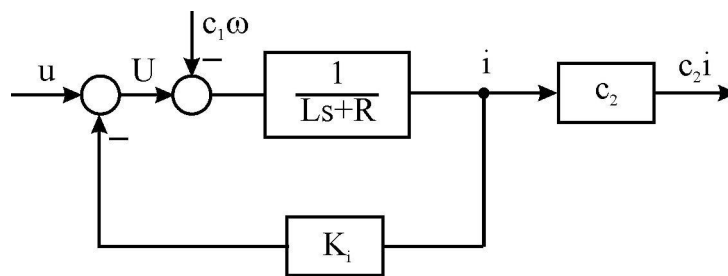
Főleg nagy elektromos időállandójú (nagy L/R érték) motoroknál célszerű kialakítani az áramszabályozási hurkot. A belső áramszabályozás célja a rendszer gyorsítása. Ezt egy, a visszacsatolásban elhelyezett P szabályozóval megvalósíthatjuk. Legyen a P szabályozó

erősítése K_i . Képezzük úgy a beavatkozó jelet, hogy tartalmazza a külső hurok beavatkozó jelét és a K_i erősítőn keresztül kialakított áram visszacsatolást:

$$U = u - K_i i \quad (8.3)$$

A (8.3) beavatkozó jelet alkalmazva a belső, áramszabályozási hurkot, mint zárt rendszert az alábbi modell írja le (lásd 8.4 Ábra):

$$H_i(s) = \frac{i(s)}{u - c_1 \omega(s)} = \frac{\frac{1}{L \cdot s + R}}{1 + K_i \cdot \frac{1}{L \cdot s + R}} \cdot c_2 = \frac{c_2}{L \cdot s + R + K_i} = \frac{\frac{c_2}{R + K_i}}{\frac{L}{R + K_i} s + 1} \quad (8.4)$$



8.4 Ábra: Belső áramszabályozási hurok

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.

8.1.1.2. A külső sebesség és pozíciósabályozási 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):

$$H_{0ref}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8.5)$$

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 sajátrezgéseinak 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.

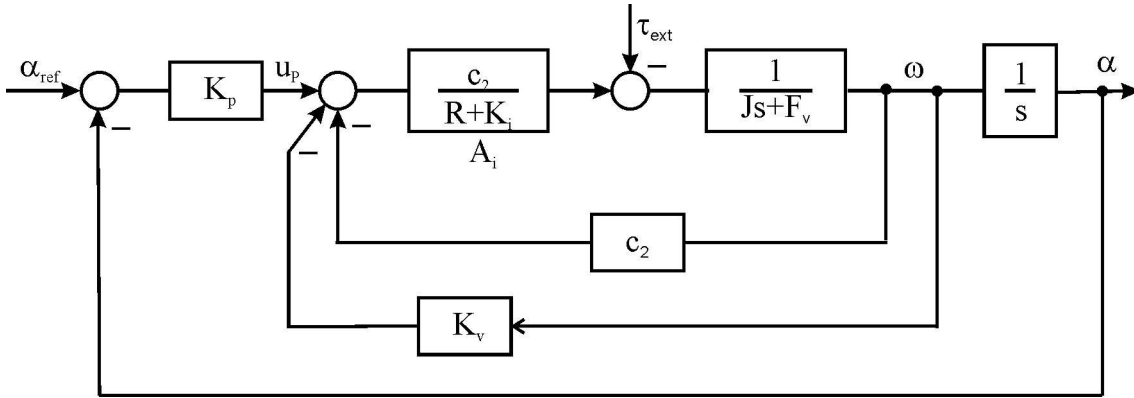
A jó zajelnyomás biztosítására a szabályozónak minél nagyobb erősítést kell választani. Számítsuk a külső szabályozási hurok beavatkozó jelét az alábbi formában:

$$u = K_p(\alpha_{ref} - \alpha) - K_v \cdot \omega \quad (8.6)$$

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:

$$A_i = \frac{c_2}{R + K_i} \quad (8.7)$$

A visszacsatolt külső hurok tömbvázlata a 8.5 Ábrán látható.



8.5 Ábra: Külső sebesség és pozíciószabályozási hurok

8.

A 8.5 Ábra alapján a belső sebességszabályozási hurok átviteli függvénye:

$$H_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{u_p(s)} = \frac{\frac{A_i}{J \cdot s + F_v}}{1 + \frac{A_i(c_2 + K_v)}{J \cdot s + F_v}} = \frac{A_i}{J \cdot s + F_v + A_i(c_2 + K_v)} \quad (8.8)$$

A teljes szabályozási kör átvitelét leíró modell:

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

$$H_o(s) = \frac{\frac{K_p \cdot A_i}{J}}{s^2 + \frac{(F_v + A_i(c_2 + K_v))}{J} \cdot s + \frac{K_p \cdot A_i}{J}} \quad (8.9)$$

Mivel a zárt rendszer modellje meg kell feleljen a referenciarendszer modelljének ($H_o(s) = H_{o_{ref}}(s)$), a (8.5) és (8.9) összefüggések alapján kapjuk:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_p \cdot A_i}{J} \\ 2\xi\omega_n = \frac{F_v + A_i(c_2 + K_v)}{J} \end{cases} \quad (8.10)$$

A (8.10) összefüggés alapján kapjuk az irányítási algoritmus paramétereit.

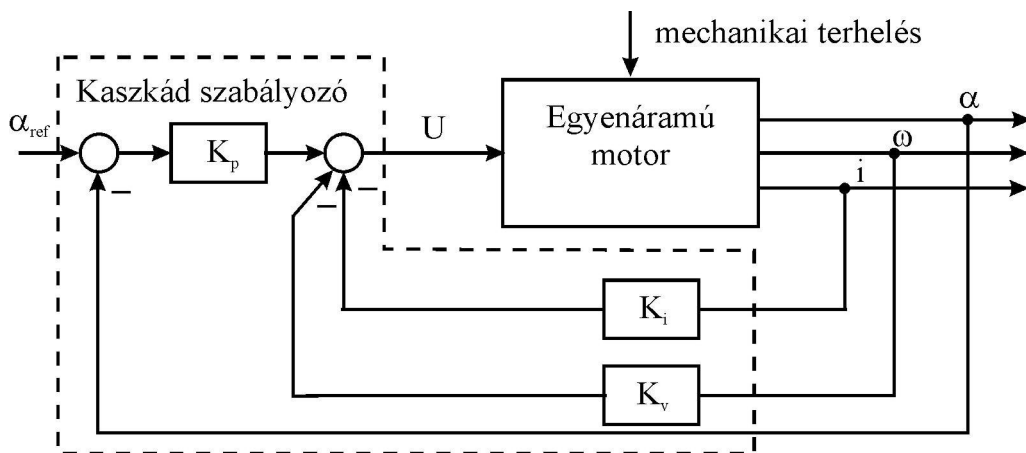
$$\begin{cases} K_p = \frac{J \cdot \omega_n^2}{A_i} \left(\leq \frac{J}{A_i} \cdot (0.5 \cdot \omega_{0M})^2 \right) \\ K_v = \frac{2\xi\omega_n J - F_v - c_2}{A_i} \end{cases} \quad (8.11)$$

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 kaszkád szabályozónak a pozícióhibát figyelembe vevő ágában, a proporcionális tag mellé integráló tagot kell elhelyezni és ezt is figyelembe kell venni a tervezésnél.

A (8.6) és (8.3) összefüggések alapján következnek az irányítás végső formája:

$$U = K_p (\alpha_{ref} - \alpha) - K_v \cdot \omega - K_i i \quad (8.12)$$

A kapott irányítási algoritmus a kaszkád 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 finomhangolható.



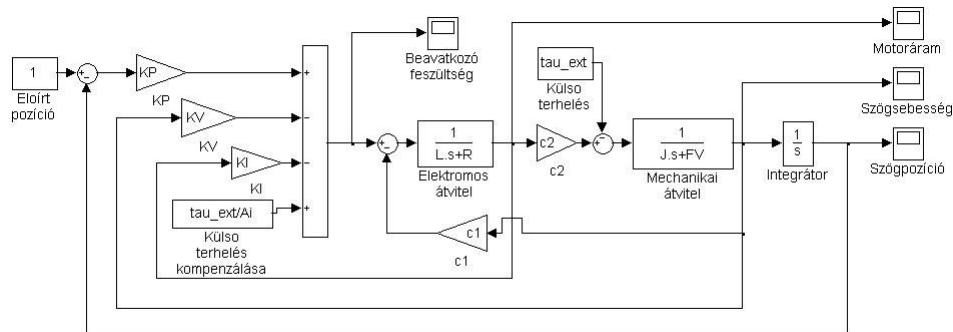
8.6 Ábra: Egyenáramú motor kaszkád szabályozása

8.1 Példa: Legyen egy egyenáramú motor az alábbi paraméterekkel: $R=7.13 \Omega$, $L=1.05 \text{ mH}$, $c_1=1/26.6 \text{ V/rad/sec}$, $c_2=0.0382 \text{ Nm/A}$, $J=0.0001 \text{ Nm}^2$, $F_V=0.001795 \text{ Nm/rad/sec}$. Tervezzünk a motornak kaskád szabályozót pozíciósabályozásra, 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.

A áramszabályozási hurok erősítésének meghatározásánál biztosítsunk kétszer gyorsabb elektromos időállandót, mint a motor eredeti időállandója ($L/R=6.79 \text{ msec}$). Ennek biztosítására, a (8.4) összefüggés alapján: $L/(R+K_i)=0.5L/R$, tehát $K_i=R=7.13$.

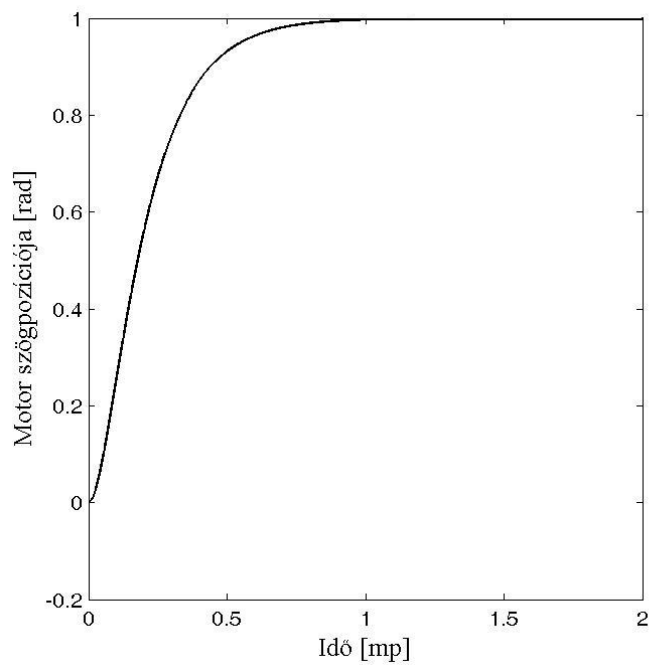
Mivel a zárt rendszer egységugrásra adott válasza aperiodikus kell legyen, a ξ csillapítás értékét a (8.5) mintarendszerben egynél nagyobbra kell választani. A minél gyorsabb válasz biztosításához válaszunk a csillapítás értékét $\xi=1.1$ -nek. A szabályozó tervezéséhez először határozzuk meg az A_i erősítésértéket a (8.7) összefüggés alapján: $A_i=0.027$. Az előírt ω_n saját körfrekvenciával a zárt rendszer szabályozó K_P és K_V paramétereit a (8.11) összefüggés alapján számíthatjuk: $K_P=3.889$, $K_V=0.147$.

A konstans külső terhelés kompenzálására bővítjük ki a (8.12) beavatkozó jelet egy extra kompenzáló taggal. A 8.5 Ábra alapján, ahhoz, hogy a külső terhelés hatását ki tudjuk ejteni, az U értékét additív taggal kell bővíteni: $U := U + \tau_{ext} / A_i$. A szabályozás Simulink diagrammja a 8.7 Ábrán látható. A szimuláció során az előírt pozíció 1 radián.

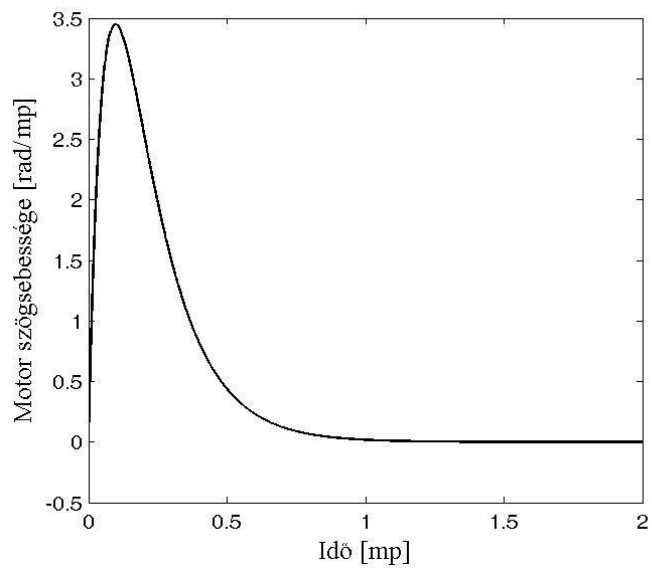


8.7 Ábra: Egyenáramú szervomotor kaskád szabályozásának Simulink diagramja

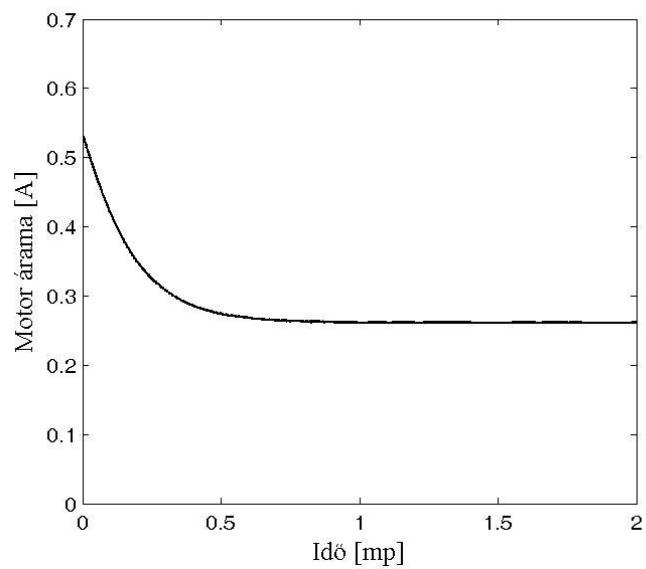
A szimulációs eredmények (rotor szögpozíció, rotor szögsebesség, motor áram és beavatkozó feszültség) a 8.8-8.11 Ábrákon láthatóak. A rotor szögpozíciója 1 másodperc alatt eléri az állandósult állapotot, a beavatkozó feszültség garantálja a nulla állandósult állapotbeli hibát. Az állandósult állapot elérése után a bemeneti feszültség és a motor áram nem nullázódik, hanem biztosítja a külső terhelés kompenzálását.



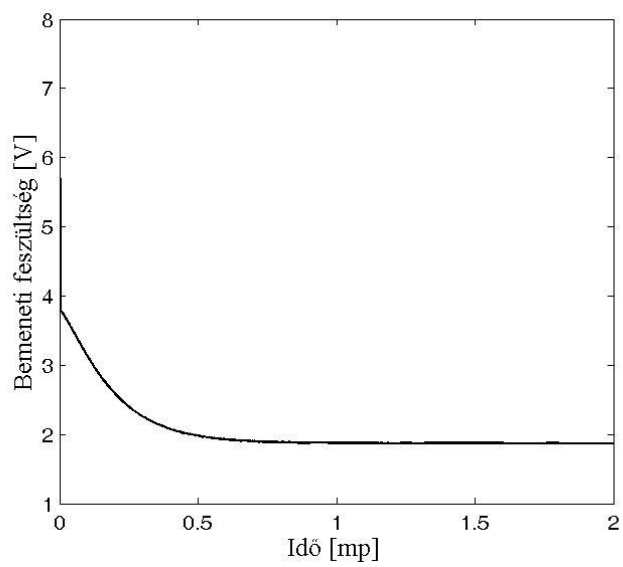
8.8 Ábra: Szabályozott motorpozíció



8.9 Ábra: Szabályozott motorsebesség



8.10 Ábra: Szabályozott motoráram



8.11 Ábra: Motorra adott feszültség (beavatkozó jel)