

MODERN JÁRMŰDINAMIKAI RENDSZEREK VIZSGÁLATA

BEVEZETÉS

A modern járműdinamikai rendszerek tervezése és üzemeltetése elképzelhetetlen az egyes folyamatok nagyfokú automatizálása nélkül. A távvezérlés, és az automatizált irányítás széles körben alkalmazott úgy a szárazföldi- (vasúti és a közúti), a vízi- (felszíni és felszín alatti), mint a légi közlekedési járművek fedélzetén. A közlekedési eszközök sok tekintetben mutatnak hasonlóságot [3, 4, 6, 7, 11, 12, 13].

Az utasok szállítása területén a közlekedési eszközök eleget kell tegyenek az utasok komfort érzete területén támasztott követelményeknek. A modern légi-, közúti-, és a vízi személyszállító eszközök fedélzetén szabályozási rendszereket alkalmaznak, amelyek biztosítják a komfortos, kényelmes utazást: a szabályozó rendszer kiküszöböli a hirtelen fékezések, és a hirtelen gyorsulások lehetőségét. A légi közlekedési eszközökkel szemben támasztott irányítástechnikai követelményeket a [3, 4, 13] könyvek foglalják össze. A katonai légi járművekkel szemben támasztott földi-, és légi üzemeltetési, illetve ütembiztonsági követelményeket, a szabályozási rendszerekkel szemben támasztott minőségi követelményeket a [14, 15, 16] katonai szabványok írják elő.

Az automatizált járműdinamikai rendszerek lényeges mértékben megkönnyítik a kezelő (irányító) személyzet tevékenységét. Repülőgépek automatikus repülésszabályozásának elméletéből és gyakorlatából régről ismert, hogy a repülés számos paraméterét állandó értéken tartja a repülésszabályozó rendszer, valamint a tolóerő szabályozó rendszer.

A szerző célja bemutatni néhány járműdinamikai rendszer irányítástechnikai vizsgálatát. A cikkben vizsgált szabályozási rendszerek részletes bemutatása a [3, 4, 11, 12, 13] irodalmakban történik.

REPÜLŐGÉP IRÁNYÍTÁSELMÉLETI VIZSGÁLATA

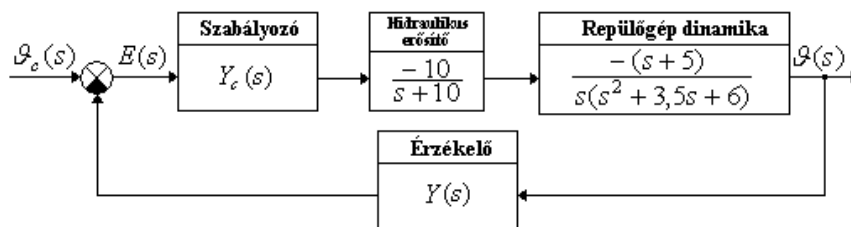
A repülőgépek térbeli mozgásának automatizálása több évtizedes múltra tekint vissza. A modern repülőgépeken alkalmazott aktív-, illetve adaptív repü-

lésszabályozó rendszerek, a Fly-by-Wire rendszerek, a Power-by-Wire technológia lehetővé teszi, hogy a szabályozástechnika legújabb elméleti eredményei a gyakorlatban is alkalmazást nyerjenek [3, 4, 13].

A repülőgépek klasszikus értelemben vett repülésszabályozó rendszere a robotpilóta, amely a repülőgépek térbeli mozgása során az Euler-szögek stabilizálását végzik. A modern repülőgépek repülésszabályozó rendszerei lehetővé teszik a légi jármű pályavezérlését is. Bár nem képezi a repülésszabályozó rendszer szerves részét, mégis meg kell említenünk a repülő hajtóművek digitális üzemmód szabályozó rendszereit, amelyek lehetővé teszik — többek között — a gazdaságos üzemanyag felhasználást.

Az automatikus repülésszabályozó rendszer az eltérés elve alapján működő, és sok esetben az értéktartást megvalósító szabályozási rendszer. A működés során felhasznált energia tekintetében a modern repülésszabályozó rendszerek elektro-hidraulikus szabályozási rendszerek.

A repülőgép bólintási szög stabilizáló rendszere a bedöntési szög állandó értéken tartására szolgál, hatásvázlata az 1. ábrán látható [3, 4, 11, 12].



1. ábra. Repülőgép helyzetstabilizáló rendszerének hatásvázlata

Vizsgáljuk meg a repülőgép alapjel követési tulajdonságait! Feltételezzük, hogy $Y(s)=1$. A tranziens analízis során a vizsgálójel legyen $g_c(t)=0,5t$, amelynek Laplace-transzformáltja a következő lesz [1, 2,]:

$$g_c(t) = s^{-2} \quad (1)$$

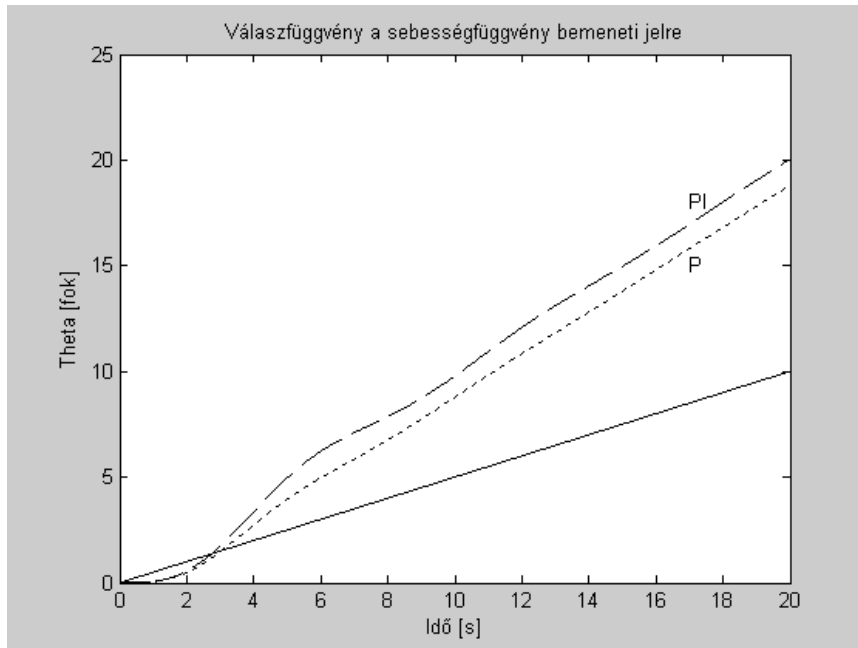
Vizsgálatainkat P- (arányos), illetve PI-típusú (arányos-integráló) soros kompenzátorra is elvégezzük. A soros jelformáló szerv átviteli függvényei legyenek az alábbiak [7, 8, 9, 10]:

$$Y_P(s) = 2 \quad (2)$$

$$Y_{PI}(s) = 2 + s^{-1} \quad (3)$$

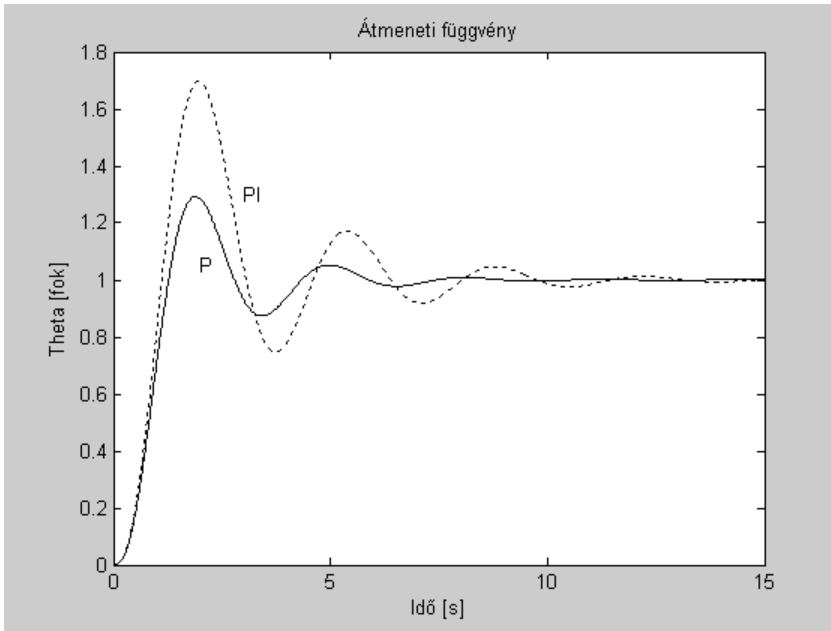
A zárt szabályozási rendszer időtartománybeli analízisének eredményei a 2. ábrán láthatóak [2, 6, 7, 8, 9, 10]. A 2. ábrán a zárt szabályozási rendszer $g_c(t)=0,5t$ bementi jelre adott válaszfüggvénye látható. Az ábra alapján

megállapítható, hogy a PI-jelformálás — a zavarelhárító képesség javítása mellett — az általunk is vizsgált alapjel követés esetében rontja a minőségi jellemzőket.



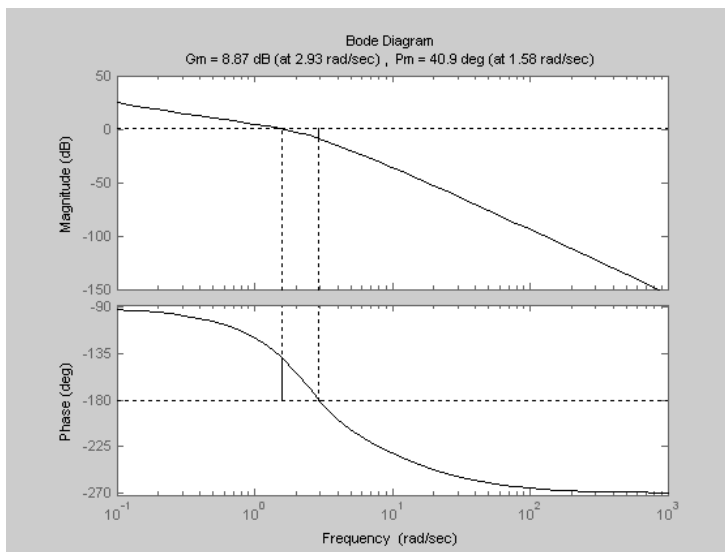
2. ábra. Repülőgép transziens analízise

Határozzuk meg a repülőgép átmeneti függvényét, amely az egységugrás bemeneti vizsgálójelre adott válaszfüggvény. Az analízis eredménye a 3. ábrán látható. Az ábra alapján megállapítható, hogy a soros PI-jelformáló szerv alkalmazása rontja a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőit: lényeges mértékben növeli a túlszabályozást, a lengésszámot, és a transziens időt. Vegyük észre, hogy a szabályozási rendszer transziens ideje meglehetősen nagy. Ha a transziens idő csökkentése indokolt, akkor a minőségi jellemzők javítása érdekében PID-soros jelformálást alkalmaznak az előre vezető ágban. Megemlíteni szükséges, hogy a PID-jelformáló szervet úgy tervezik, hogy a differenciáló (D) jelleg zajkiemelő hatása miatt a gyakorlatban nem tisztán D-jelformálót alkalmaznak, hanem olyan sávszűrőt terveznek, amelynek integráló (I) hatása a szűrni kívánt zavaró jelek tartományában hat, a differenciáló (D) hatása pedig a bemeneti jelek tartományában javítja a minőségi jellemzőket: gyorsítja a rendszer minőségi jellemzőit.

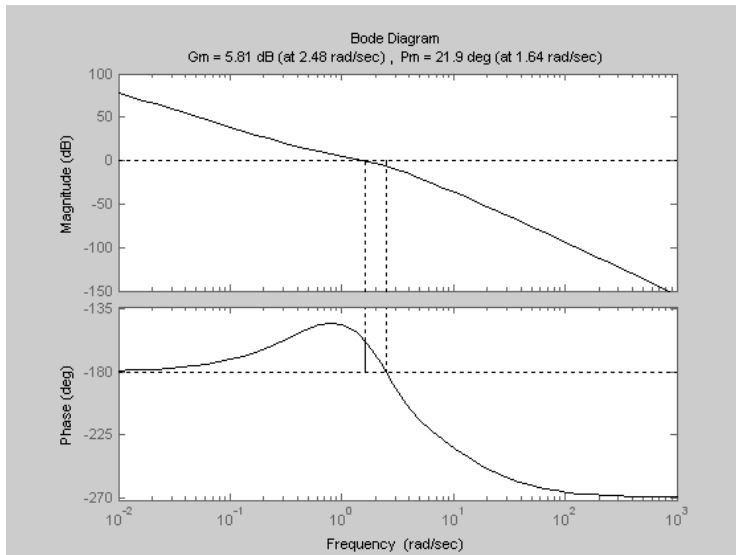


3. ábra. Repülőgép átmeneti függvénye

Vizsgáljuk meg a felnyitott szabályozási rendszer viselkedését frekvenciatartományban. Az analízis eredménye a 4. ábrán látható.



4.a ábra. Repülőgép Bode-diagramja P-szabályozó esetén



4.b ábra. Repülőgép Bode-diagramja PI-szabályozó esetén

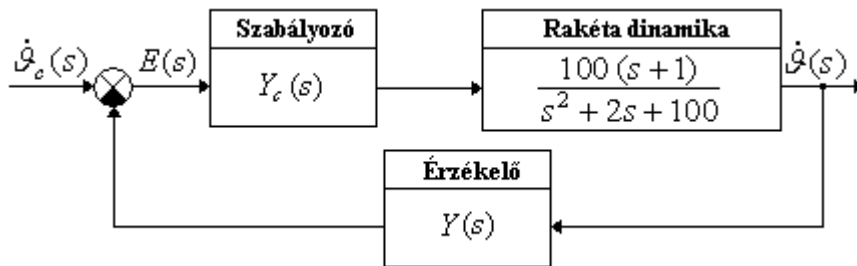
A 4.a és a 4.b ábrákon látható diagramok alapján elmondható, hogy a fázistartalék $40,9^\circ$ (P-szabályozó) értékről $21,9^\circ$ (PI-szabályozó) értékre csökken, míg az erősítési tartalék $8,87$ dB értékről $5,81$ dB értékre csökken. Megállapítható, hogy az integráló jelformálás lényeges mértékben rontja az alapjel követés minőségi jellemzőit. Mindazonáltal előfordulhat, hogy a zavarelhárítás javítása érdekében mégis a PI-szabályozó alkalmazása javasolt. Korábbról ismeretes, hogy a gyakorlatban — hasonló esetben — PID-jelformáló szervert alkalmaznak. Az automatikus repülésszabályozó rendszerek részletes analízisével a [3, 4, 13] irodalmak foglalkoznak, és a téma iránt érdeklődők figyelmébe ajánlottak.

RAKÉTA IRÁNYÍTÁSELMÉLETI VIZSGÁLATA

A levegő-levegő osztályú rakéták rávezetése során az egyik megoldandó fontos feladat a rakéta keresztengelye körüli bólintó mozgás szabályozása [11, 12, 13]. A rakéta bólintási csillapító automatájának hatásvázlata az 5. ábrán látható. A további vizsgálataink során feltételezzük, hogy a szabályozási rendszer egységnyi, merev visszacsatolású, vagyis $Y(s)=1$. A rakéta soros kompenzátora legyen PI-típusú, és az átviteli függvény a következő egyenlettel írható le:

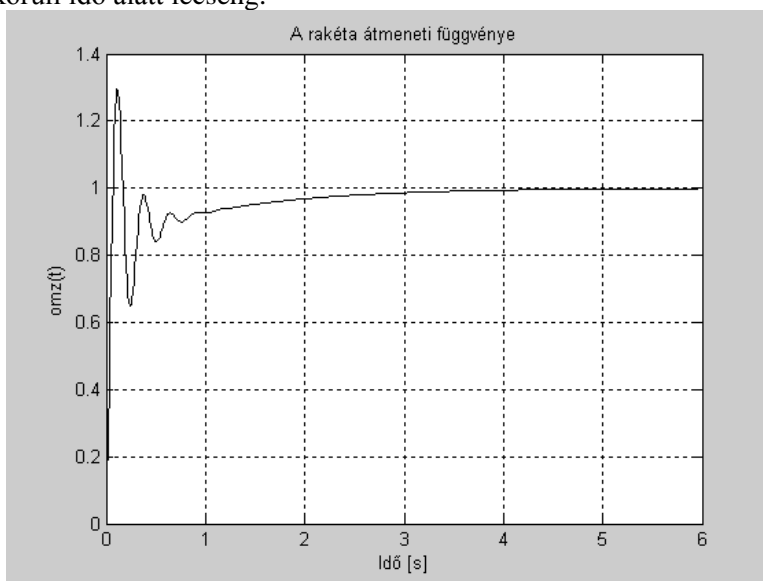
$$Y_c(s) = 0,1 + \frac{5}{s} \quad (4)$$

Vizsgáljuk meg a szabályozási rendszer idő-, és frekvenciatartománybeli viselkedését!



5. ábra. Rakéta bólintási csillapító automatájának hatásvázlata

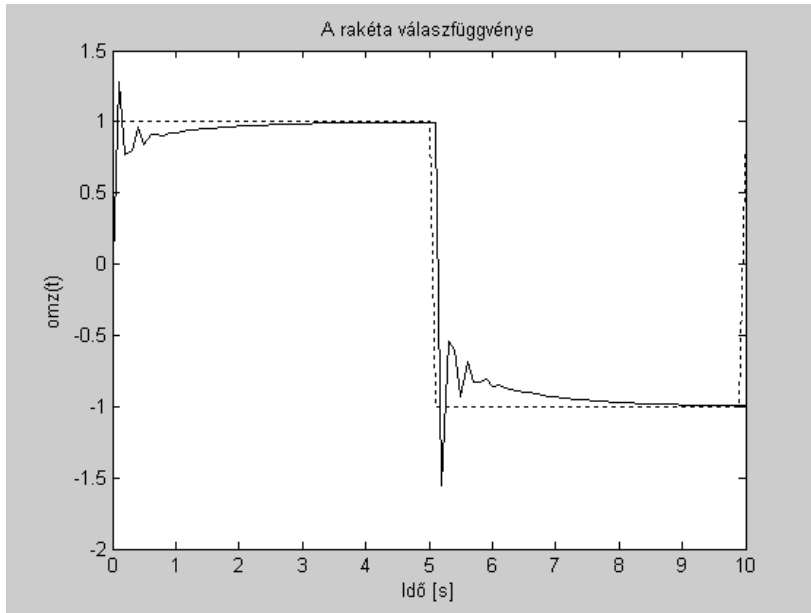
A rakéta átmeneti függvénye a 6. ábrán látható. Mint a 6. ábrán jól látható, a zárt szabályozási rendszer gyors működésű, a tranziens folyamat 2 másodperc körüli idő alatt lecseng.



6. ábra. Rakéta átmeneti függvénye

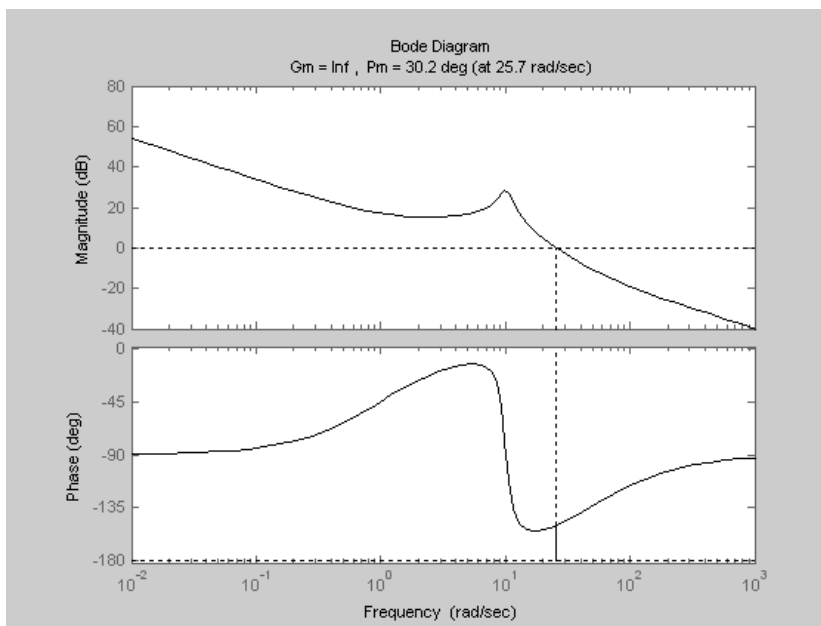
Az átmeneti folyamat viszont erősen lengő jellegű: nagy értékű a túlszabályozás, és nagy a lengésszám is. Könnyen belátható, hogy a fenti esetben alkalmazott egységugrás vizsgálójel csak ritkán figyelhető meg a zárt szabályozási rendszerben, mint bemeneti jel.

Gyakran fordul elő, hogy a rakétát négyszögjel, vagy fűrészjel alakú vizsgáló jelekkel, esetleg ezektől is bonyolultabb függvényű időfüggvényekkel megadható vezérlő jelekkel irányítják. A 7. ábrán egy 10 s periódusidejű, és egységnyi amplitúdójú négyszögjelre adott válaszfüggvényt láthatjuk.



7. ábra. A rakéta tranziens analízise

Vizsgáljuk meg a felnyitott szabályozási rendszer viselkedését a frekvencia-tartományban. Az analízis eredménye a 8. ábrán látható.

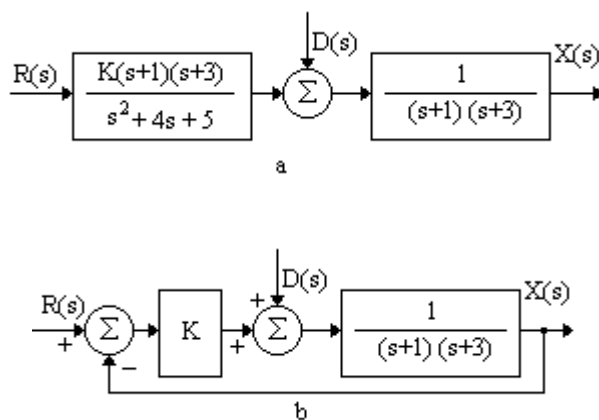


8. ábra. A rakéta Bode-diagramja

A 8. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a szabályozási rendszer erősítési tartaléka végtelen nagy értékű, míg a fázistartalék értéke az adott és a rendszerben alkalmazott szabályozó esetén $30,2^\circ$. Elmondható tehát, hogy a csillapító automatája még a PI-struktúrájú szabályozó esetén is biztosítja a szabályozási rendszer minőségi jellemzőit.

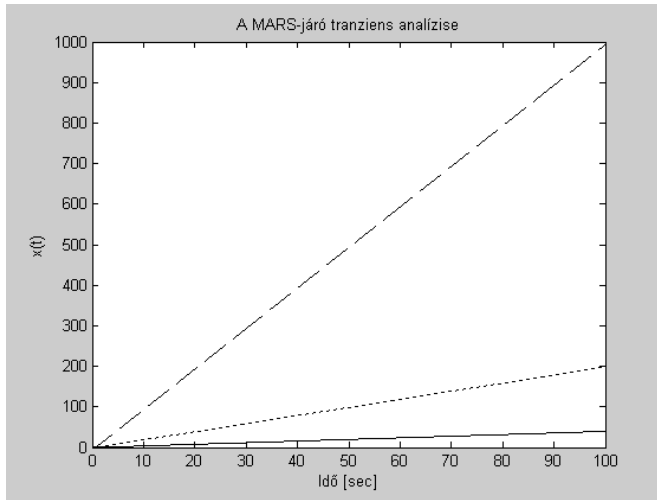
A MARS-JÁRÓ SZABÁLYOZÁSI RENDSZERÉNEK IRÁNYÍTÁSELMÉLETI VIZSGÁLATA

A Mars-járót a Mars felszínén végzendő kutatásokra tervezték. A Mars-járó egyik irányítási módja, amikor a Földről operátor irányítja azt a fedélzetén elhelyezett kamerák Földre továbbított képei alapján. A Mars-járó felnyitott- és a zárt szabályozási rendszerének hatásvázlatát Dorf és Bishop (1995) publikálta. A felnyitott és a zárt szabályozási rendszer hatásvázlata a 9. ábrán látható.



9. ábra. A felnyitott és zárt szabályozási rendszer hatásvázlata

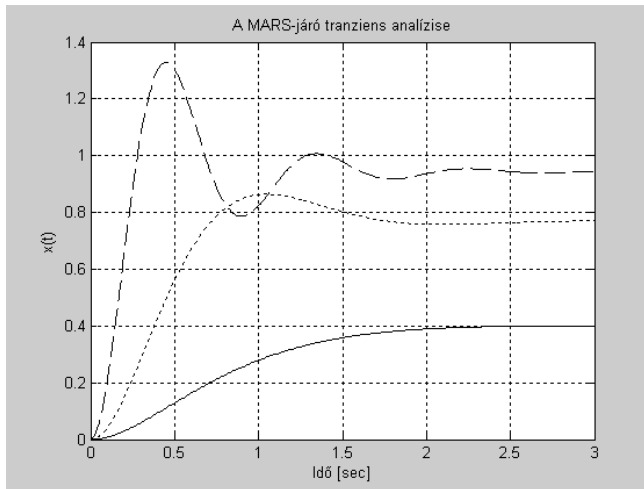
Először vizsgáljuk meg a felnyitott szabályozási rendszer alapjel követési tulajdonságait (9. a. ábra). Az analízis során tekintsük bemeneti jelnek az $r(t) = t$ vizsgálójelet. Feltételezzük, hogy a szabályozó erősítése az értékeket veszi fel: $K = 2, 10, 50$. A nyílt hatáslánc viselkedése a 10. ábrán látható.



10. ábra. '—' K=2, '....' K=10, '- - - -' K=50

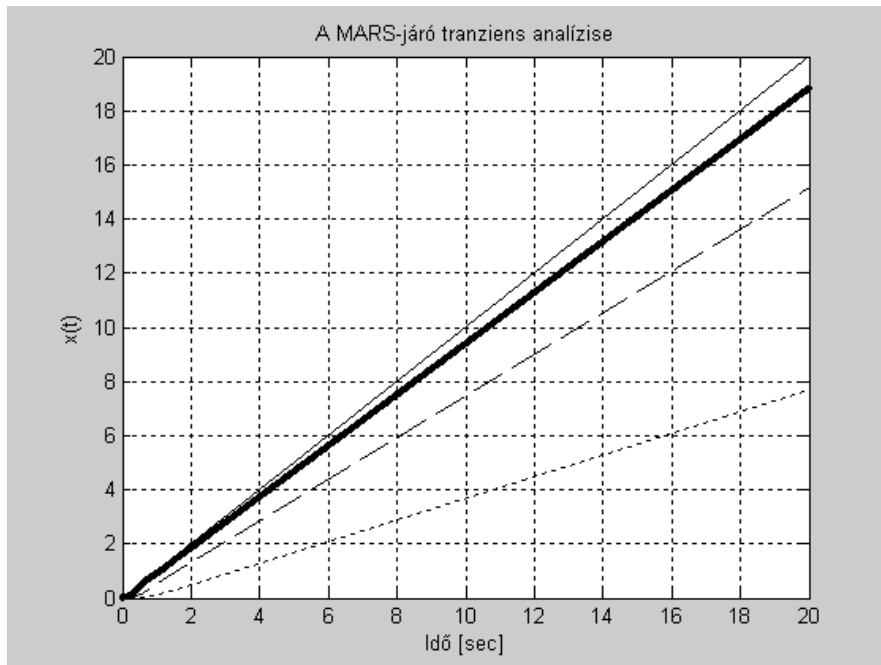
Mint az a 10. ábrán látható, a szabályozó erősítésének növelése az $x(t)$ függvény meredekségét lényegesen növeli, így a jármű egységnyi idő alatt lényegesen nagyobb távolságot tesz meg. A jármű gyorsítását tehát a K erősítési tényező növelésével érhetjük el.

A továbbiakban vizsgáljuk meg a zárt szabályozási rendszer alapjel követési tulajdonságait (9. b. ábra). Az analízis során határozzuk meg az átmeneti függvényt $r(t) = 1(t)$ esetén. A tranziens analízis eredménye a 11. ábrán látható [3, 6, 7].



11. ábra. '—' K=2, '....' K=10, '- - - -' K=50

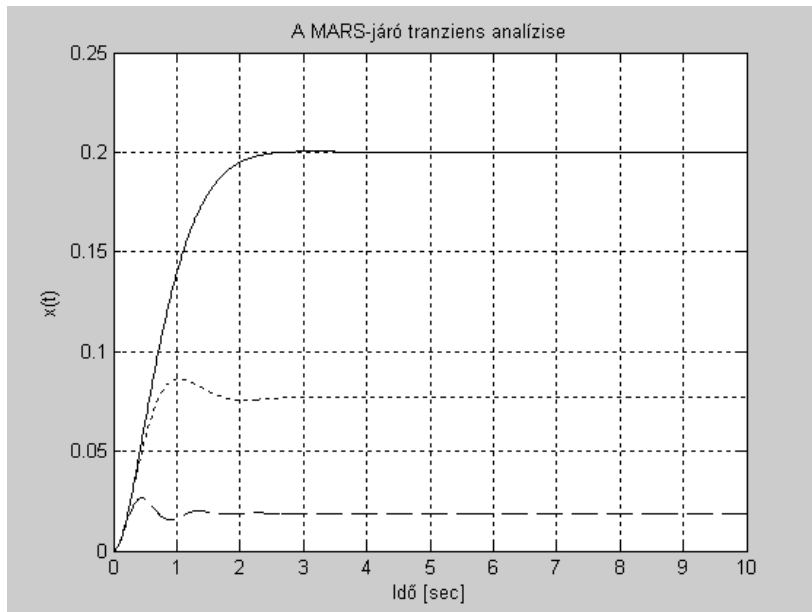
A 11. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a szabályozási rendszer kimeneti jele egyre inkább közelít az egységnyi értékhez, de eközben lényegesen növekszik a szabályozási rendszer lengési hajlama. Az erősítés értékét nem lehet minden határon túl növelni, mert így a zárt rendszer minőségi jellemzői romlanak. Vizsgáljuk meg a zárt szabályozási rendszer viselkedését az $r(t) = t$ vizsgálójel esetén. A tranziens analízis eredményei a 12. ábrán láthatóak. Az ábrán folytonos vonallal ábrázolva a vizsgálójel időfüggvénye látható.



12. ábra. '.....' K=2, '-----' K=10, '- - - -' K=50

A 12. ábra alapján elmondható, hogy a szabályozó erősítésének növelése esetén az egységsebesség válaszfüggvények meredeksége szintén növekszik, tehát a jármű egységnyi idő alatt nagyobb távolságot tesz meg. Az alapjel követési tulajdonságok vizsgálata mellett mindenképpen szükséges a zavarelhárítás vizsgálata.

Zérusértékű referencia jel esetén vizsgáljuk a szabályozás zavarelhárítását, ha bemeneti jelnek tekintjük a $d(t) = 1(t)$ zavaró jellemzőt, amely jól reprezentálja a sziklás talaj egyenetlenségeit. A szabályozási rendszer kimeneti jele a 13. ábrán látható.



13. ábra. '—' K=2, '....' K=10, '- - - -' K=50

A 13. ábra alapján elmondható, hogy a K erősítési tényező növelésével csökken a szabályozási rendszer kimeneti jele, amely a Laplace-transzformáció végérték-tétele alapján az alábbiak szerint határozható meg:

$$x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{1}{s^2 + 4s + 3 + K} \right) \frac{1}{s} = \frac{1}{3 + K} \quad (5)$$

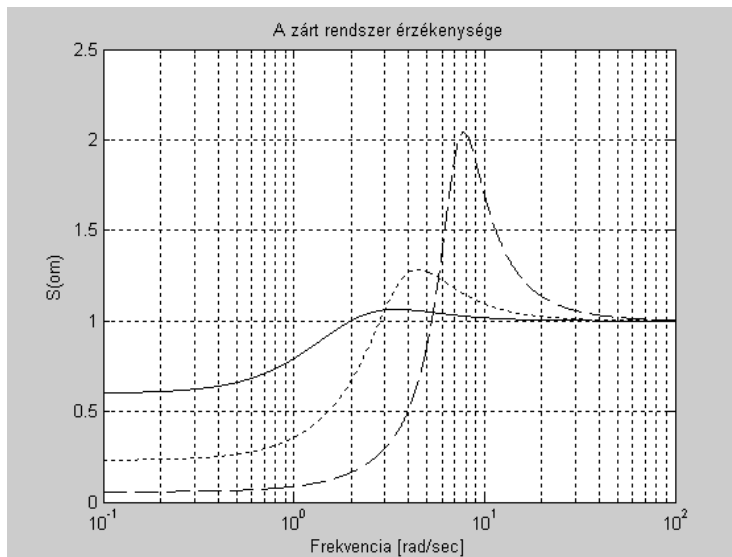
Mint azt az előbbieken tapasztaltuk, a szabályozó K erősítési tényezője lényeges befolyásolja az alapjel követési és a zavarelhárítási tulajdonságokat. Mivel a szabályozási rendszerrel szemben támasztott minőségi követelményeket egyidejűleg kell teljesíteni, ezért a zárt szabályozási rendszer K -szerinti érzékenység vizsgálatát mindenképpen célszerű elvégezni. Először határozzuk meg a zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvényét. A 9.b ábra alapján kapjuk, hogy:

$$W_c(s) = \frac{K}{s^2 + 4s + 3 + K} \quad (6)$$

A K -szerinti érzékenység az alábbi egyenlet alapján határozható meg:

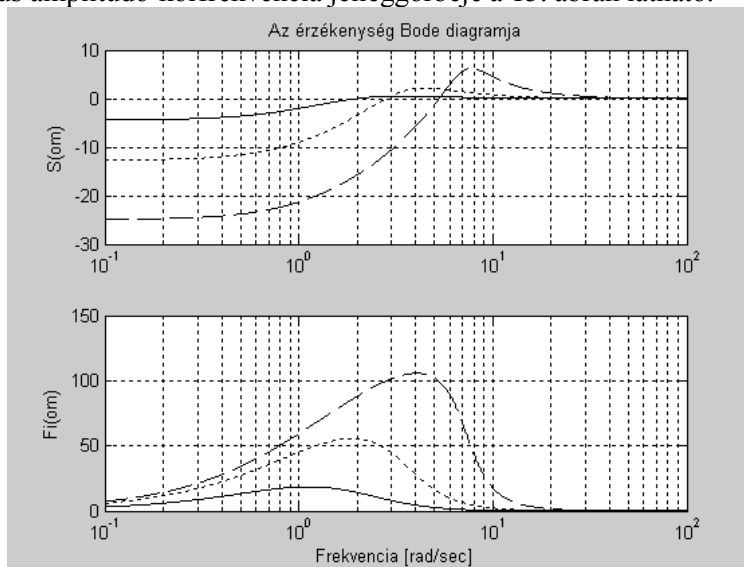
$$S_K^{W_c}(s) = \frac{dW_c(s)}{dK} \frac{K}{W_c(s)} = \frac{s^2 + 4s + 3}{s^2 + 4s + 3 + K} \quad (7)$$

Az érzékenység amplitúdó-körfrekvencia jelleggörbéje a 14. ábrán látható.



14. ábra. '—' K=2, '....' K=10, '- - - -' K=50

A 14. ábrán jól látható, hogy kisfrekvenciás tartományban csökken, közepes frekvenciatartományban lényegesen növekszik az érzékenység, míg nagyfrekvenciás tartományban egységnyi értékű. Az érzékenység függvény logaritmusos amplitúdó-körfrekvencia jelleggörbéje a 15. ábrán látható.



15. ábra. '—' K=2, '....' K=10, '- - - -' K=50

A szabályozó K erősítési tényezője alapvetően befolyásolja a szabályozás minőségi jellemzőit. A minőségi jellemzők egymásnak ellentmondó módon is változhatnak, ezért a K értékének megválasztása során kompromisszumot kell kötni az alapjel követési és a zavarelhárítási tulajdonságok biztosítása területén.

REPÜLŐGÉP ANYAHAJÓRA TÖRTÉNŐ LESZÁLLÁSÁNAK IRÁNYÍTÁSELMÉLETI VIZSGÁLATA

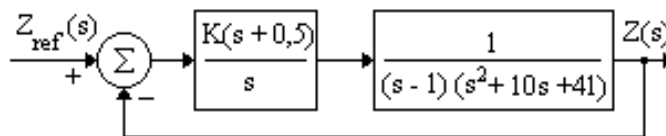
A repülőgép anyahajóra történő leszállítása meglehetősen bonyolult feladat. A repülőgép-vezető három feladatot lát el. A leszállás során a „leszállópálya” tengelyén és a sikló pályán tartja a repülőgépet, valamint beállítja a megfelelő repülési sebességet. A továbbiakban vizsgáljuk meg az iránypályán történő leszállás folyamatát. Mivel a pilóta egyszerre három repülési jellemzőt is ellenőriz a leszállás során, ezért a szabályozási rendszerben a hajózót az alábbi átviteli függvénnyel lehet modellezni [1, 9, 10, 11, 12]:

$$Y_1(s) = \frac{(s+0,5)}{s} \quad (8)$$

A repülőgép oldalirányú dinamikája instabil és a következő átviteli függvénnyel határozható meg [11, 12]:

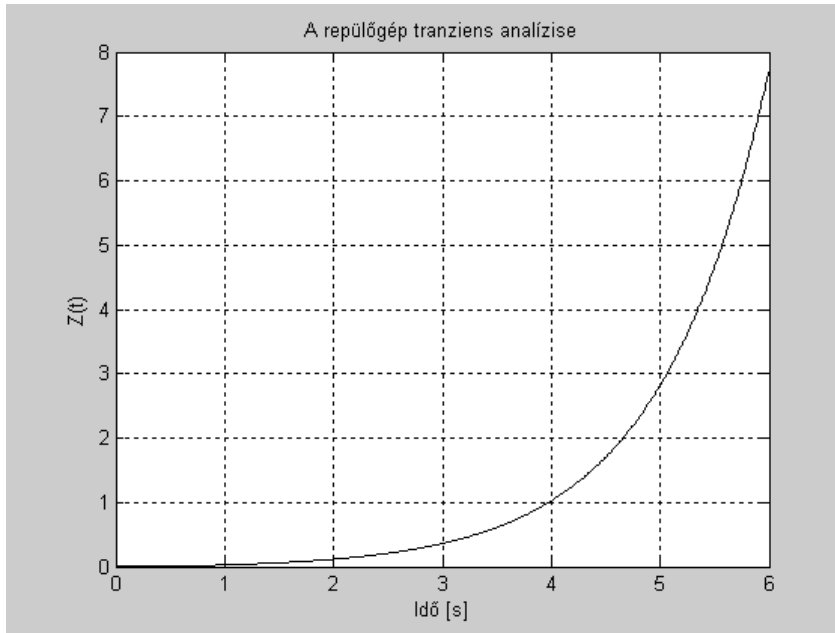
$$Y_2(s) = \frac{1}{(s-1)(s^2+10s+41)} \quad (9)$$

A zárt rendszer hatásvázlata a 16. ábrán látható.



16. ábra. A zárt rendszer hatásvázlata

Vizsgáljuk meg a repülőgép oldalirányú mozgásának transziens viselkedését. A nemirányított repülőgép analízisének eredménye a 17. ábrán látható.



17. ábra. Az oldalkoordináta transziens viselkedése

Az analízis során bemeneti jelnek tekintjük az oldalkoordináta egységnyi változását, amit — például — az oldalszél hozhat létre. A nemirányított repülőgép minőségi jellemzőit az alábbi táblázat foglalja össze:

Sajátvektorok	Csillapítási tényező, ξ	Körfrekvencia, rad/s
1,00	-1	1,00
$-5+4i$	0,781	6,40
$-5-4i$	0,781	6,40

Határozzuk meg a K erősítési tényező azon értékeit, amely esetén a szabályozási rendszer stabilis működésű. A 16. ábrán látható zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvénye a következő lesz:

$$W(s) = \frac{K(s+0,5)}{s(s-1)(s^2+10s+41)+K(s+0,5)} \quad (10)$$

A (10) egyenletből a zárt rendszer karakterisztikus egyenlete az alábbi módon írható fel:

$$K(s) = s^4 + 10s^3 + 31s^2 + s(K-41) + 0,5K = 0 \quad (11)$$

A (11) karakterisztikus egyenlet alapján határozzuk meg a Hurwitz-determinánst:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 9 & K-41 & 0 & 0 \\ 1 & 31 & 0,5K & 0 \\ 0 & 9 & K-41 & 0 \\ 0 & 1 & 31 & 0,5K \end{vmatrix}, \quad (12)$$

melyet kifejtve kapjuk, hogy:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 9 & K-41 \\ 1 & 31 \end{vmatrix} = 320 - K > 0, K < 320, \quad (13)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 9 & K-41 & 0 \\ 1 & 31 & 0,5K \\ 0 & 9 & K-41 \end{vmatrix} = -K^2 + 320,5K - 13120 > 0 \quad (14)$$

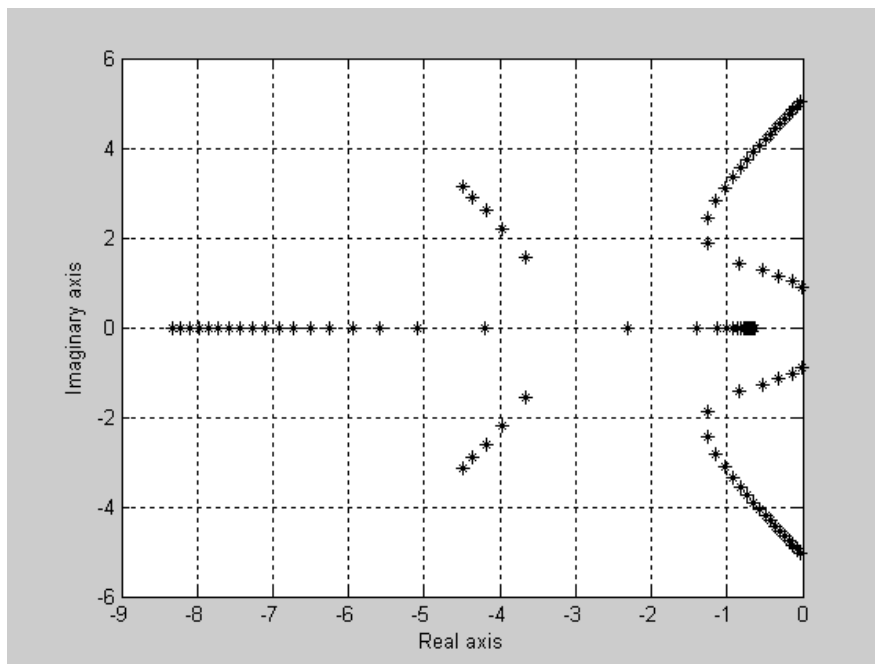
$$48,18 < K < 272,32$$

$$\Delta_4 = 0,5K \Delta_3 > 0, K > 0 \quad (15)$$

A (13), a (14) és a (15) egyenletek alapján az erősítés értéke a következő:

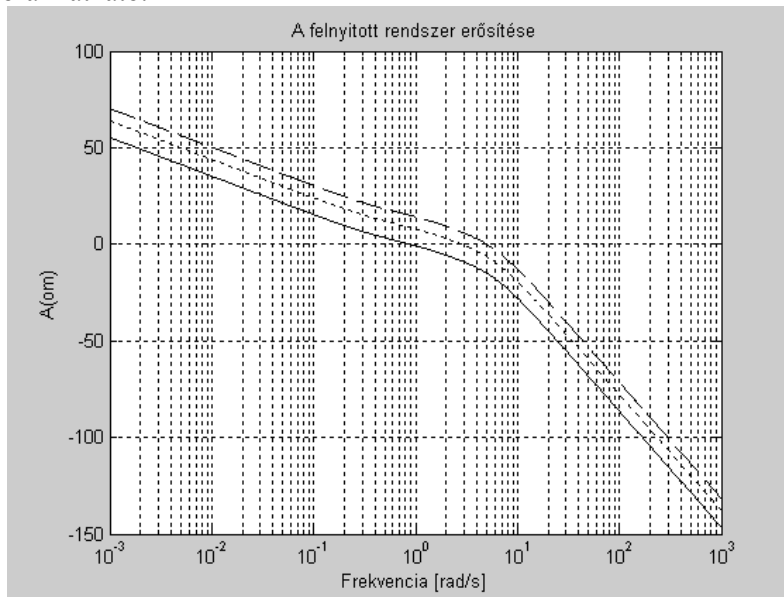
$$48,18 < K < 272,32 \quad (16)$$

A stabilis működési tartományban változtassuk a K-t a minimális és a maximális értékek között mindig 10-zel növelve azt. Az egyes erősítésekhez tartozó sajátvektorokat a 18. ábrán láthatjuk.



18. ábra. Az egyes erősítésekhez tartozó sajátvektorok

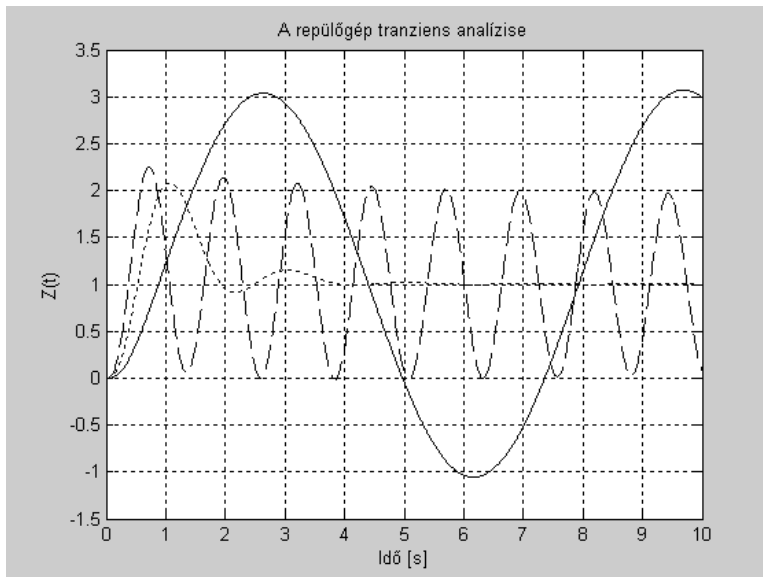
Vizsgáljuk meg a felnyitott szabályozási rendszer frekvenciatartománybeli viselkedését a K erősítés 48, 130 és a 270 értékeire. Az analízis eredménye a 19. ábrán látható.



19. ábra. A felnyitott szabályozási rendszer Bode-diagramja
 '—': $K=48$, '.....': $K=130$, '- - -': $K=270$

A 19. ábrán jól látható, hogy az erősítés növelésével nő a hurokerősítés. Kisfrekvenciás tartományban — ahol a pilóta bemeneti jelei is hatnak — nagy erősítéssel viszi át a jeleket a szabályozási rendszer. Közepes frekvenciatartományban a jó stabilitási viszonyok biztosítása érdekében a görbék meredeksége közel -20dB/dekad . Nagyfrekvenciás tartományban a szabályozás jól szűri a zavaró jeleket.

A szabályozási rendszer frekvenciatartománybeli viselkedése mellett mindenképpen szükséges a zárt szabályozási rendszer analízise is. A vizsgálatok során az erősítés 48, 130 és a 270 értékeit vettük figyelembe. A (16) egyenlet alapján elmondható, hogy a 48 érték a stabilis működés alsó-, míg a 270 érték a stabilis működés felső határát reprezentálja. A zárt szabályozási rendszer tranziens analízisének eredményei az erősítés korábban megadott három értékére a 20. ábrán látható.



20. ábra. Transziens analízis
 '—': $K=48$, '.....': $K=130$, '- - -': $K=270$

A 20. ábrán jól látható, hogy a 48 és a 270 erősítések esetén a zárt szabályozási rendszer a stabilis működés határára kerül. A 130 erősítés esetén az oldalkoordináta — erősen lengő jelleggel — beáll a vizsgálójel értékére. A zárt szabályozási rendszer szűkebb értelemben vett minőségi jellemzőinek beállítására további jelformálást kell alkalmazni.

BEFEJEZÉS

A modern szabályozástechnikai rendszerek előzetes tervezésekor szükségszerűen digitális számítógépet kell alkalmazni. A megtervezett rendszer idő- és frekvenciatartománybeli analízisének eredményei, és a minőségi jellemzők alapján el kell dönteni, hogy szükséges-e a szabályozási rendszer szabályozójának további hangolása. Ha igen, akkor újabb szabályozót tervezünk, és újra elvégezzük a felnyitott, illetve a zárt szabályozási rendszer analízisét. A szabályozó előzetes tervezését mindaddig folytatjuk, amíg az előírt minőségi követelmények nem teljesülnek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] D'Azzo, J. J. – Houpis, C. H. *Linear Control System Analysis and Design*, McGraw-Hill, Inc., 1995.

- [2] Biran, A. – Breiner, M. *MATLAB[®] for Engineers*, Addison-Wesley, Publishing Company, Inc., 1995.
- [3] Nelson, R. C. *Flight Stability and Control*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.
- [4] McLean, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [5] Ogata, K. *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall International, Inc., 1990.
- [6] Ogata, K. *Designing Linear Control Systems with MATLAB[®]*, Prentice-Hall, International, Inc., 1994.
- [7] Ogata, K. *Solving Control Engineering Problems with MATLAB[®]*, Prentice-Hall, International, Inc., 1994.
- [8] Shahian, B. — Hassul, M. *Control System Design Using MATLAB[®]*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [9] *MATLAB[®] 6.5 — The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [10] *Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB[®]* (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [11] Dorf, R. C. — Bishop, R. H. *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, 1995.
- [12] Dorf, R. C. — Bishop, R. H. *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, 2001.
- [13] Blakelock, J. H. *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1965.
- [14] *MIL-F-8785C, Notice 2, Flying Qualities of Piloted Airplanes*, 1996.
- [15] *MIL-F-9490D, Notice 1, Flight Control Systems – Design, Installation, and Test of Piloted Aircraft, General Specification*, 1992.
- [16] *MIL-C-18244A, Amendment 1, Control and Stabilization System: Automatic, Piloted Aircraft, General Specification*, 1993.