

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP OLDALIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK ÁLLAPOTVÁLTOZÓIT STABILIZÁLÓ ZÁRT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER SZABÁLYOZÓJÁNAK ELŐZETES TERVEZÉSE

SZEGEDI Péter - BÉKÉSI Bertold

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Bolyai János Katonai Műszaki Kar
Repülő és Légvédelmi Intézet, Fedélzeti Rendszerek Tanszék
5008 Szolnok, Kilián u. 1.
szegedi.peter@zmne.hu
bekesi.bertold@zmne.hu

KIVONAT

A cikkben a Szojka-III pilóta nélküli repülőgép repülésmechanikai matematikai modelljei vizsgálatának eredményei kerülnek bemutatásra. A vizsgálatokat állandó tömegű ($m=135$ kg), állandó magasságon (400 m), 110, 130, 150, 170, 190 km/h sebességgel repülő repülőgépen végezték.

1. A ROBOTPILÓTÁK OLDALIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI MINŐSÉGI KÖVETELMÉNYEI

A repülőgépek repülésszabályozó rendszereinek előzetes tervezése a repülőgép identifikált repülésmechanikai matematikai modelljeire épül. A szabályozótervezés szükséges és elégséges feltétele, hogy a repülőgép repülésmechanikai matematikai modellje teljesen megfigyelhető, és teljesen irányítható legyen, valamint, hogy ismertek legyenek a szabályozott szakasz állapotváltozói.

Bedöntési szög stabilizálás csillapítási tényezője	$0,6 \leq \xi < 1,2$	
Bedöntési szögstabilizálás pontossága (statikus hiba)	Turbulencia mentes légkör esetén	$\pm 1^\circ$
	Turbulencia esetén	$\pm 10^\circ$
Írányszög-stabilizálás pontossága (statikus hiba)	Turbulencia mentes légkör esetén	$\pm 0,5^\circ$
	Turbulencia esetén	$\pm 5^\circ$
Csillapított repülőgép időállandója	$\tau_\gamma = 1,4 - 3$ sec	
Dőlési csillapító automata túlszabályozása	$< 60^\circ$	
bedöntési szög 30° -ra beállítás	$\leq 3,9$ sec	
Holtidő	$t_h \leq 0,2$ sec	
Erősítési tartalék	> 8 dB	
Fázis tartalék	$> 60^\circ$	

1. táblázat. Az oldalirányú mozgás minőségi követelményei

A szabályozási rendszerekkel szemben támasztott alap követelmény a szabályozott jellemző időkésés és hiba nélküli, rendszerre ható külső és belső zavaró jellemzőktől független, alapjel-követése. Ez a követelmény valós rendszerekben nem, vagy csak

valamekkora hibával valósul meg. A szabályozás minőségét e hiba alkalmasan megválasztott mutatóival lehet jellemezni. A hiba két részre bontható, statikus és dinamikus hibára. A szabályozási rendszer tervezése során fontos az állandósult állapotbeli (maradó, statikus) szabályozási hiba minimalizálása.

A [11] irodalom a pilóta nélküli repülőgépek légi alkalmassági és biztonsági minőségi követelményeire a pilóta által vezetett repülőgépekre vonatkozó FAA 23 AC 23.13.09–1C (Equipment, Systems and Installations) szabvány alkalmazását javasolja. A vizsgált pilóta nélküli repülőgép kormányozhatósági-, irányíthatósági- és irányítástechnikai minőségi követelményeinek meghatározására a Magyarországon is rendelkezésre álló, nem minősített katonai szabványgyűjteményeket alkalmaztuk, a [5, 6, 7] irodalmakban megfogalmazott irányítástechnikai minőségi követelményeket az 1. táblázat tartalmazza.

A szabályozótervezés célja, hogy adott irányítástechnikai minőségi követelményeknek megfelelő szabályozási rendszer létrehozása, amely magába foglalja a szabályozási struktúra, a szabadon választható jelek és paraméterek alkalmas megválasztását. A tényleges szabályzó kialakítását természetesen ezeken kívül számos más (pl.: eszközméretezés, energiafelhasználás, üzemi környezet, technológia, gazdasági és üzembiztonsági szempontok stb.) tényező is befolyásolja [2].

A szabályozó előzetes méretezésének általános elvárásai:

- maradó hiba nélkül, vagy megengedett értékű statikus hibával kövesse az egyes repülési paraméterek alapjeleit;
- legyen képes kiszűrni, vagy csillapítani a zárt szabályozási rendszerre ható sztochasztikus zajokat és zavarásokat;
- a repülőgép robotpilótája, mint zárt szabályozási rendszer feleljen meg a [5, 6, 7] irodalmakban meghatározott minőségi követelményeknek.

2. PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP OLDALIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK IDŐTARTOMÁNYBELI ANALÍZISE

A pilóta nélküli repülőgép, mint nemirányított szakasz minőségi jellemzőinek megismerése, összevetése a zárt robotpilóta rendszerekkel szemben támasztott minőségi követelményekkel, biztosítja az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények biztosításához szükséges szabályozó megtervezését.

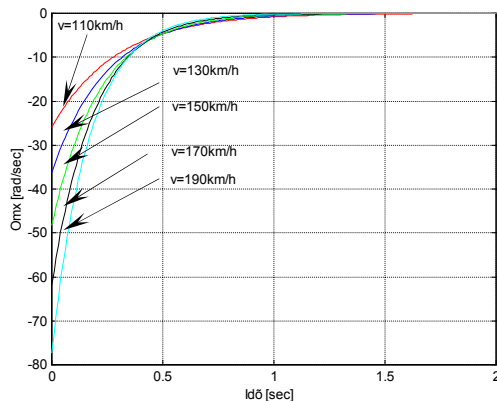
A robotpilótákkal szemben támasztott alapvető követelmény a megfelelő pontosságú alapjel-követés. A gyakorlatban a repülésszabályozó rendszerek alapjel-követését az alábbi bemenőjelekre szokás vizsgálni:

- $x_a(t) = \delta(t)$, Dirac-delta impulzus – a zárt szabályozási rendszer (repülőgép) stabilitását vizsgálhatjuk [1, 9, 12].
- $x_a(t) = 1(t)$, egységugrás jel – a rendszer átmeneti függvényét ismerhetjük meg [10, 12].

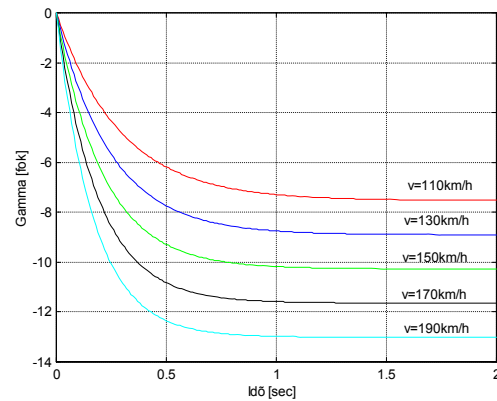
Gyors működésű kormányrendszerek esetén az egyes kormányfelületek meghibásodása okán bekövetkező szögkitérés egységugrás jellegűnek is tekinthető. A robotpilóta zárt szabályozási rendszerének irányítástechnikai minőségi jellemzői az átmeneti függvényből származtathatók.

A pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének megtervezéséhez szükséges a nemirányított repülőgép hosszirányú- és oldalirányú mozgása minőségi jellemzőinek ismerete. Ebben a cikkben, a továbbiakban csak a repülőgép oldalirányú mozgásának minőségi jellemzőit vizsgálták a szerzők.

A vizsgált repülőgép nem irányított oldalirányú mozgása, az orsózó szögsebesség (ω_x) és a bedöntési szög (γ) állapotváltozóinak tranziens analízise során a repülőgép bemeneti jelnek tekintettük a csűrőlapok Dirac-impulzus jellegű kitérítését. A mozgás állapotváltozóinak viselkedése a 1. és a 2. ábrákon látható.

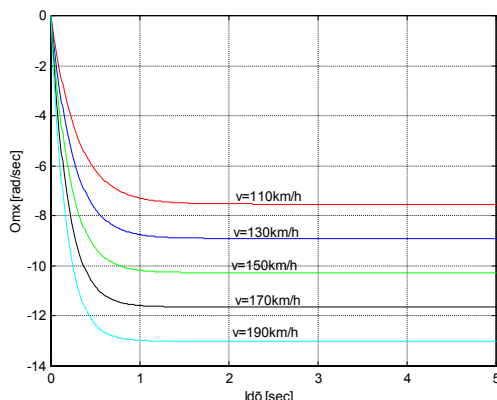


1. ábra. Az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye

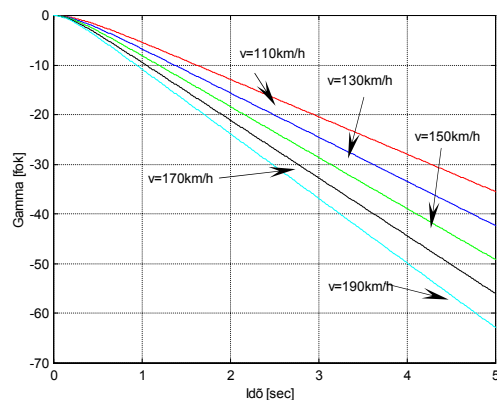


2. ábra. A bedöntési szög impulzusválasz függvénye

A nemirányított rendszer orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye kezdetben exponenciálisan változik, majd $t \rightarrow \infty$ estén zérushoz tart minden vizsgált üzemmódon (1. ábra). A nemirányított repülőgép Dirac-impulzus gerjesztésre adott válasza kezdetben exponenciálisan változik, majd $t \rightarrow \infty$ esetén konstans értékre áll be a repülési sebesség függvényében (2. ábra).



3. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye



4. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvénye

Az átmeneti függvények meghatározása során a repülőgép bemeneti jele a csűrőlapok egységugrás jellegű kitérítése. A 3. és 4. ábrán a repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása állapotváltozóinak tranziens viselkedése látható. Az orsózó szögsebesség időbeli lefolyása kezdetben exponenciálisan változó jellegű, majd $t \rightarrow \infty$ esetén a

repülési sebesség növekedésével növekvő abszolút értéket vesz fel (3. ábra), míg a bedöntési szög időfüggvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan szét tartóvá válnak (4. ábra).

A Szojka–III repülőgép nemirányított, oldalirányú mozgás irányítástechnikai minőségi jellemzőit a 2. táblázat foglalja össze [3].

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: $v=110$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-3,44	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	3,44
2. üzemmód: $v=130$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-4,07	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	4,07
3. üzemmód: $v=150$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-4,69	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	4,69
4. üzemmód: $v=170$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-5,32	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	5,32
5. üzemmód: $v=190$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-5,94	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	5,94

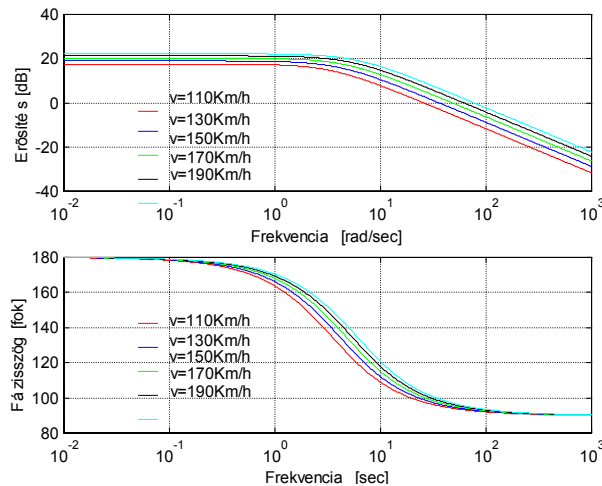
2. táblázat. Az oldalirányú mozgás minőségi jellemzői

A 2. táblázatban olvasható, hogy az oldalirányú mozgás karakterisztikus egyenletei az origóban, és a negatív tengelyen elhelyezkedő pólusokkal rendelkeznek. A csillapítási tényező értéke -1 és 1.

3. A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP OLDALIRÁNYÚ MOZGÁSÁNAK FREKVENCIATARTOMÁNYBELI ANALÍZISE

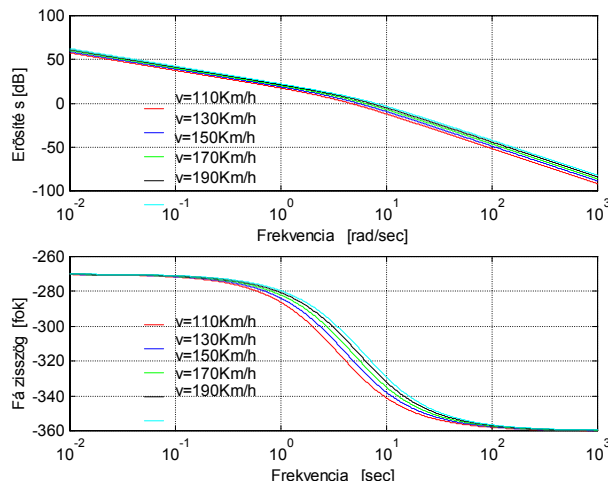
A repülőgépet térbeli mozgása során a frekvenciatartományban jól leírható külső és nagyfrekvenciás belső zavaró jelek gerjesztik. A fellépő külső és belső zajok repülőgépre gyakorolt hatásának ismerete is szükséges a megfelelő minőségi jellemzőket biztosító szabályozási rendszer megtervezéséhez [4, 10].

Az 5. és a 6. ábrákon az oldalirányú mozgás állapotváltozóinak Bode–diagramjait látjuk. Az 5. ábrán látható, hogy az amplitúdó karakterisztika kis- és közepes frekvencia tartományon frekvencia független. A törésponti frekvenciától nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő értékeket vesz fel, a repülési sebesség növekedésével az erősítés abszolút értéke nő, az erősítés-, és fáziskarakterisztika egytároló jellegűt mutat.



5. ábra. Az orsózó szögsebesség Bode-diagramja

A 6. ábrán látható erősítés karakterisztikák — a frekvencia növekedésével — monoton csökkenő jellegűek, kismagyas tartományban a repülési sebességtől függetlenül gyakorlatilag együtt futnak.



6. ábra. A bedöntési szög Bode-diagramja

Az oldalirányú mozgás állapotváltozóinak minőségi jellemzői lényegében függetlenek a repülési sebességtől. Az amplitúdó-, és a fázistartalék az összes vizsgált repülési üzemmódon nulla [8].

A Szojka–III pilótanélküli repülőgép nemirányított oldalirányú mozgásának 1. táblázatban felsorolt és a [5, 6, 7] irodalmakban előírt irányítástechnikai minőségi követelmények az összevetéséből, illetve az elvégzett vizsgálatok és számítógépes szimulációk alapján megállapítottuk, hogy a vizsgált repülési üzemmódokon az erősítési-, és a fázistartalékok zérusértékűek, amelyek nem felelnek meg az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek, vagyis a repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása instabil. A pilóta nélküli repülőgép biztonságos légi üzemeltetéséhez, a stabilitási problémák megoldására (előírt irányítástechnikai minőségi követelmények biztosítására), repülésszabályozó rendszer tervezése javasolt.

4. AZ OLDALIRÁNYÚ MOZGÁS ÁLLAPOTVÁLTOZÓIT STABILIZÁLÓ REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER ELŐZETES TERVEZÉSE

Az állapotváltozók stabilizálására választott LQR módszer célja egy olyan rendszer létrehozása, amely egy előzetesen kiválasztott minőségi jellemző lehető legnagyobb vagy legkisebb értéke, vagy egy tervezési kritérium szempontjából a legjobb, függetlenül a rendszer kezdeti állapotától és irányításától. [13, 14].

Az előzetesen meghatározott szempontok alapján optimális szabályozás tervezéséhez szükség van $u(t)$ vezérlőjelre (jelekre \rightarrow vezérlőjel vektor), amely minimalja a J költségfüggvényt (optimális rendszerek tervezésében a költségfüggvény helyettesíti a hagyományos tervezési kritériumokat.) egy meghatározott $x(t_0) = x_0$ kiindulási állapot esetén azzal a korlátozással, hogy a folyamatot az $\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t]$ összefüggés írja le. (Mivel az állapotegyenlet csak a vezérelt folyamatot írja le, az optimális szabályozás problémája azt a tévhitet keltheti, hogy a feladat egy felnyitott kör tervezésére irányul, de a tervezés befejeztével látjuk, hogy az optimális szabályozás rendszerint függ a kimenőjeltől, vagy az állapotváltozóktól, vagyis zárt szabályozási rendszert kaptunk). A J költségfüggvény az állapotvektor és az irányító vektor skalár függvényének integrálja:

$$J = \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} F[x(t), u(t), t] dt \rightarrow \min \quad (1)$$

ahol:

F – skalár függvény.

Egy adott lineáris rendszer esetében a tervezés célja megkeresni azt a vezérlési törvényt, ami biztosítja a költségfüggvény vagy célfüggvény minimális értékét:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [x^T Q x + u^T R u] dt \rightarrow \min \quad (2)$$

ahol az x állapotváltozó vektor, az u irányító vektor, a $Q \geq 0$ az állapotváltozók pozitív szemidefinit diagonális súlyozó mátrixa, ami biztosítja, hogy a másodfokú alak bármilyen x_i értéknél pozitív, vagy legfeljebb zérusértékű. Az $R > 0$ a bemeneti vektor rendezőinek diagonális súlyozó mátrixa. Az integrálandó $x^T Q x$ a minőségi jellemzőkről hordoz információt, az $u^T R u$ a költségeket jellemzi. Az $u^T R u$ másodfokú alak $u = 0$ kivételével sohasem lehet zérus, egyébként a költségfüggvény érzéketlenné válna az egyes irányító jel értékekre.

Az (2) integrálkritérium lokális minimalizálásához meg kell határozni a Q és az R mátrixok elemeit, melyek segítségével meghatározható a $u_{opt}(t) = -Kx(t)$ optimális vezérlési törvény.

Az LQR feladat megoldása során alkalmazott súlyozó mátrixok előzetes beállítására, ha nem ismertek az x állapot-, és az u bemeneti vektorok korlátozásai, alkalmazhatjuk az egységnyi, vagy azonos súlyozás elvét. A módszer a lényege, hogy az x

állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} és az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} mátrix összes főátlón álló eleme egységnyi.

Egy másik lehetőség a reciprok négyzetes módszer alkalmazása, melynek lényege, hogy az egyes állapotváltozókra biztonsági, vagy egyéb más okok, mint pl. a repülőgép manőverező képessége stb. miatt korlátozásokat vezetnek be, amelyek figyelembevételével meghatározzák a szabályozási rendszer \mathbf{x} és az \mathbf{u} vektorai rendezőit. Az \mathbf{x} állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} diagonális mátrix elemeit a $q_{ii} = \frac{1}{|x_{i,\max}(t)|^2}$ (q_{ii} az állapotvektor rendezőit súlyozó pozitív skalár, $x_{i,\max}(t)$ az egyes állapotváltozók maximális értéke), az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix elemeit a $r_{ii} = \frac{1}{|u_{i,\max}(t)|^2}$ (r_{ii} az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix főátlón álló elemei, míg az $u_{i,\max}(t)$ az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőinek maximális értéke) egyenletek alapján határozzák meg. Az előzőekben ismertetett módszereket alkalmazva végeztük az előzetes szabályozótervezést, amelynek folyamán kerestük az $\mathbf{u}_{opt}(t)$ optimális vezérlési törvényt, amely a \mathcal{J} költségfüggvény minimalizálásával a lineáris rendszert egyik egyensúlyi állapotából a másikba viszi át [5, 6, 7, 14, 15, 16, 17]. A vizsgált pilóta nélküli repülőgép dinamikáját az (3) egyenlet, a [3] szakirodalomban található adatokkal feltöltött mátrixokkal adja meg.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}\end{aligned}\quad (3)$$

A repülőgép oldalirányú mozgásának vizsgált állapotvektorai:

$$\mathbf{x}_o^T = [\omega_x \quad \gamma] \quad (4)$$

Bemeneti paraméterként értelmezett szögkitérésekkel arányos jelek:

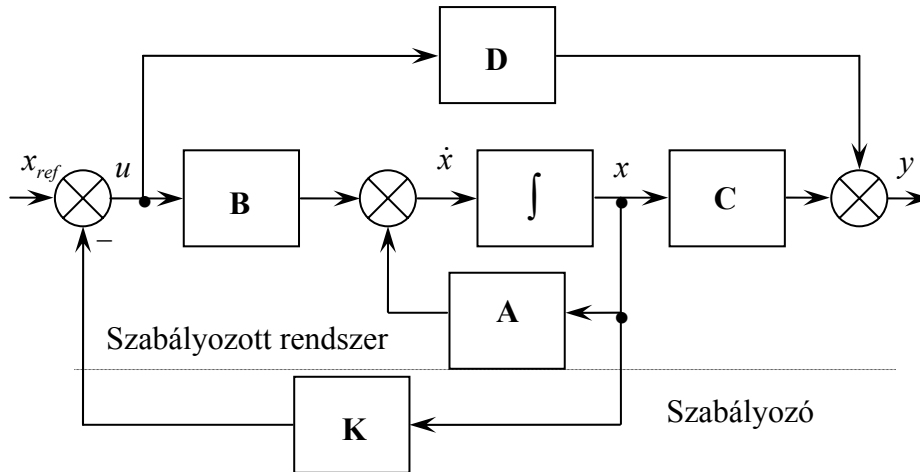
$$\mathbf{u}_o = u_o = \delta_{cs} \quad (5)$$

A [18] irodalomban elvégzett irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálatok alapján elmondható, hogy a repülőgép a rendelkezésre álló bemeneti paraméterekkel irányítható, az összes állapotváltozója megfigyelhető, így a nemirányított repülőgép matematikai modellje eleget tesz a szabályozótervezés szükséges és elégséges feltételeinek.

A Szojka–III repülőgép oldalirányú állapotváltozóinak korlátozásait nem ismerve a súlyozó mátrixok előzetes beállítására az egységnyi súlyozás elvét alkalmaztuk. Első lépésként az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix, valamint az \mathbf{x} állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} diagonális mátrix főátlóin álló elemeit egységnyinek választottuk, a $\mathbf{Q}_{o1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, és $\mathbf{R}_{o1} = 1$. A pilóta nélküli repülőgép, négyzetes integrálkritériumon alapuló (LQR) módszerrel tervezett, egységnyi súlyok

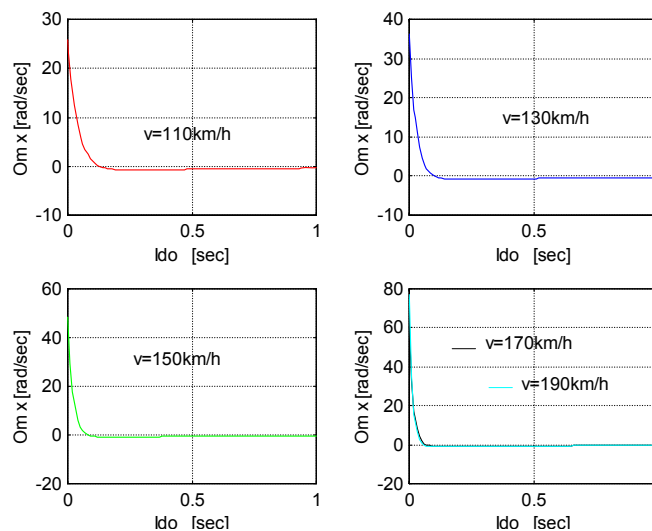
alkalmazásával meghatározott, oldalirányú irányítási csatorna (7. ábra) optimális teljes állapot–visszacsatolási mátrixai a következők:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o1} &= [-0,9136 \quad -1]; \quad \mathbf{K}_{o2} = [-0,9211 \quad -1] \\ \mathbf{K}_{o3} &= [-0,9278 \quad -1]; \quad \mathbf{K}_{o4} = [-0,9337 \quad -1] \\ \mathbf{K}_{o5} &= [-0,9389 \quad -1] \end{aligned} \quad (6)$$



7. ábra. A teljes állapot–visszacsatolású szabályozási rendszer

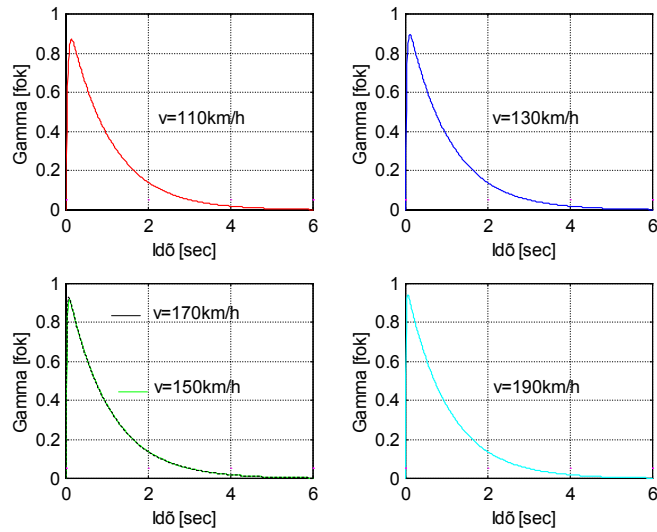
Az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvényei (8. ábra) gyakorlatilag függetlenek a repülési sebességtől, időbeli lefolyásuk gyors ($t_{tr} < 0,5 \text{ sec}$) és nagy intenzitású.



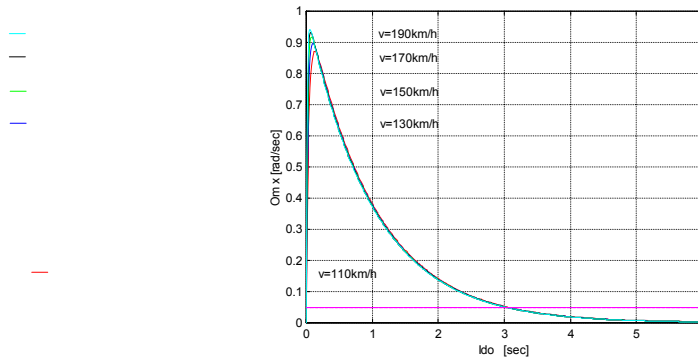
8. ábra. Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei, \mathbf{Q}_{o1} ; \mathbf{R}_{o1} súlyozás

Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei a repülési sebességtől függetlenül teljesítik a stabilitás feltételét, a transziens idő elteltével felveszik kezdeti értéküket.

A bedöntési szög súlyfüggvényei (9. ábra) jó közelítéssel egybeesők, és a transziensidejük $t_{tr} \cong 3 \text{ sec}$. A transziens folyamatok lezajlása után a súlyfüggvények felveszik kezdeti értéküket, vagyis teljesítik a stabilitás feltételét.



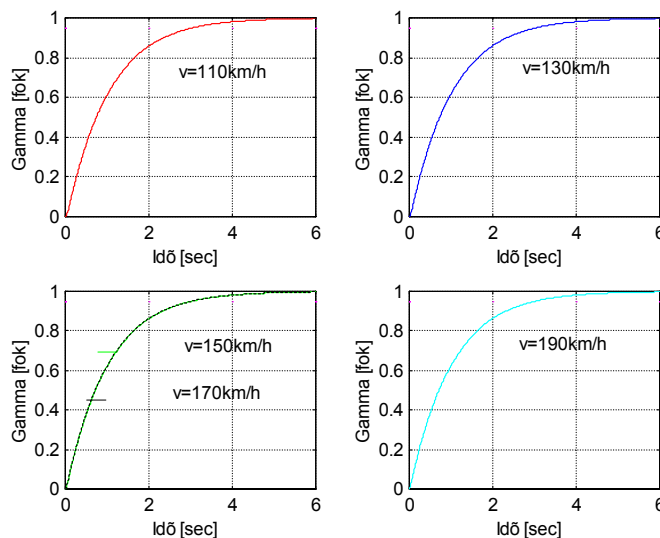
9. ábra. A bedöntési szög súlyfüggvényei, Q_{o1} ; R_{o1} súlyozás



10. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye, Q_{o1} ; R_{o1} súlyozás

Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye (10. ábra) $t_{rr} \cong 3 \text{ sec}$ alatt válik nullává minden repülési üzemmódon. Az orsózó szögsebesség kisebb, mint 1 rad/sec elfordulással válaszol az egységugrás bemenőjelre. A bedöntési szög átmeneti függvényei maximális értéküket ($\nu_{\max} = 1$) a repülési sebességtől függetlenül túlszabályozás nélkül érik el (11. ábra).

A rendszer minden vizsgált üzemmódon negatív valós sajátértékekkel rendelkezik, és a csillapítási tényező értéke 1 (3. táblázat). A táblázatban látható, hogy az oldalirányú mozgás állapotváltozói a repülési sebességtől függően $-0,992$ és $-0,997$ között, és $-26,1$ és $-77,5$ között változnak. Az origóhoz közeli, a valós tengelyen elhelyezkedő $-0,992$ és $-0,997$ értékű pólusok miatt az oldalirányú állapotváltozók átmeneti függvényei exponenciális felfutásúak és kritikus csillapításúak.



11. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvénye, $Q_{o1}; R_{o1}$ súlyozás

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,992	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,992
-26,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	26,1
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,994	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,994
-36,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	36,4
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,996	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,996
-48,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	48,4
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,996	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,996
-62,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	62,1
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,997	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,997
-77,5	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	77,5

3. táblázat. Az oldalirányú mozgás minőségi jellemzői

A műszaki gyakorlatban a szabályozók tervezése során arra törekszünk, hogy a zárt szabályozási rendszer dinamikáját a domináns póluspár határozza meg, így a tervezés folytatásaként a súlyozó mátrixok elemeit heurisztikusan addig hangoltuk, amíg a zárt szabályozási rendszer két negatív előjelű valós gyöke komplex konjugált domináns póluspárt nem alkotott.

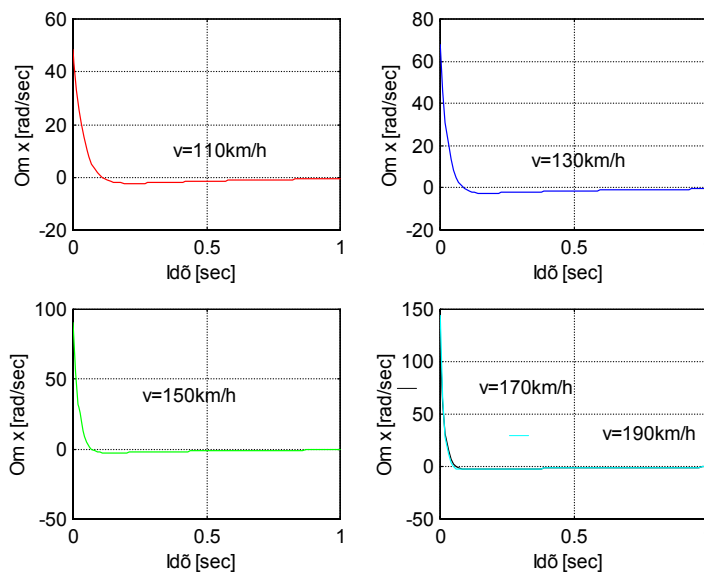
A heurisztikusan hangolt rendszer állapot-visszacsatolási mátrixai, $\mathbf{Q}_{o2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3.5 \end{bmatrix}$,

$\mathbf{R}_{o2} = 1$ súlyozások esetén:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o11} &= [-0,9452 \quad -1,8708]; & \mathbf{K}_{o21} &= [-0,9441 \quad -1,8708] \\ \mathbf{K}_{o31} &= [-0,9453 \quad -1,8708]; & \mathbf{K}_{o41} &= [-0,9474 \quad -1,8708] \\ \mathbf{K}_{o51} &= [-0,9499 \quad -1,8708] \end{aligned} \quad (7)$$

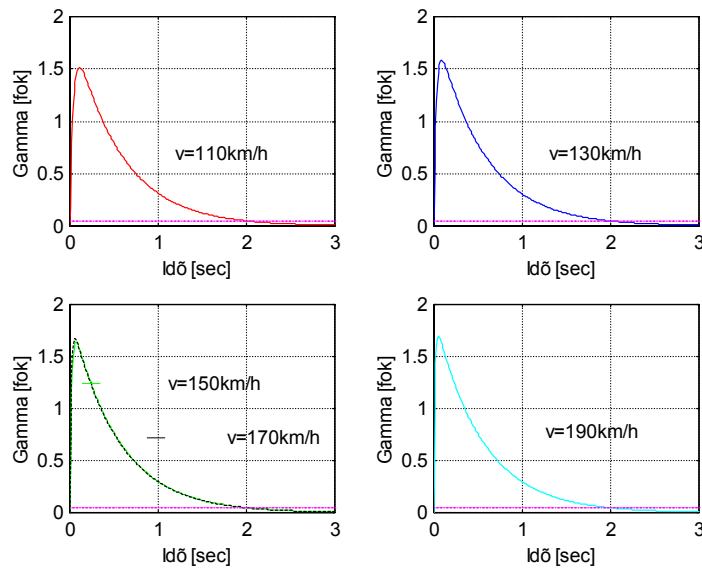
Az \mathbf{x} állapotvektorokat rendező \mathbf{Q}_{o2} súlyozó mátrix q_{22} elemének növelése az állapot-visszacsatolási mátrixok értékeinek csökkentését eredményezte, ami a későbbi megvalósítás esetén kisebb energia felhasználással járhat. A zárt rendszer időtartományú analizisének eredményei a 12. – 15. ábrákon láthatók.

Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényeinek időbeli lefolyása a vizsgált üzemmódokon a repülési sebességtől függően a 12. ábrán láthatók. A 8. ábrán látható $\mathbf{Q}_{o1}; \mathbf{R}_{o1}$ súlyozáshoz tartozó súlyfüggvényekhez képest a tranziens idő kismértékben ($0,4 < t_{tr} < 1 \text{ sec}$), míg a zárt szabályozási rendszer lengési hajlama lényegesen növekedett, de a függvények jellege nem változott.



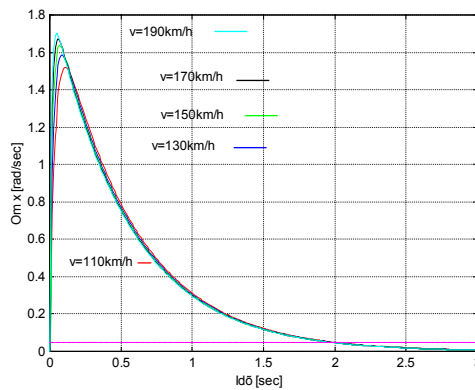
12. ábra. Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei, $\mathbf{Q}_{o2}; \mathbf{R}_{o2}$ súlyozás

A 13. ábrán látható bedöntési szög súlyfüggvényei tranziensideje, $t_{tr} \cong 2 \text{ sec}$. A 9. ábrán látható súlyfüggvényekhez képest a $\mathbf{Q}_{o2}; \mathbf{R}_{o2}$ súlyozás esetén a 13. ábrán látható súlyfüggvények tranziensideje csökkent, de a függvények időbeli lefolyása nem változott. A vizsgált súlyfüggvények alapján elmondható, hogy az oldalirányú mozgás állapotváltozói továbbra is stabil működésűek.



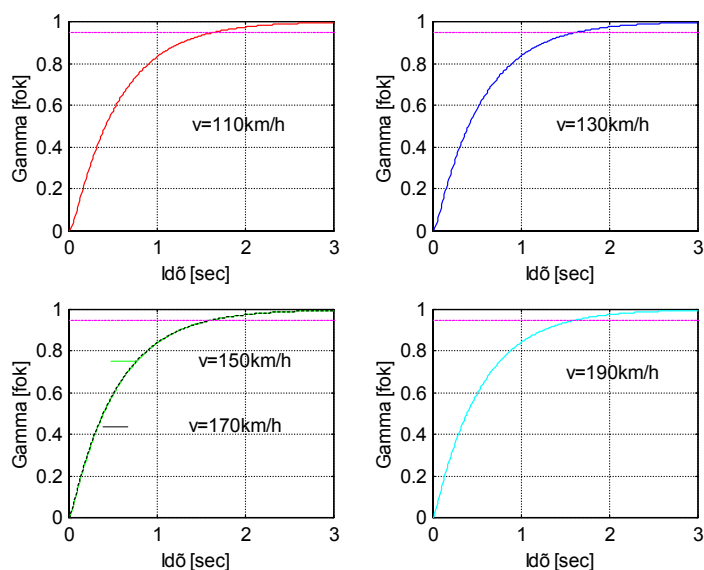
13. ábra. A bedöntési szög súlyfüggvényei, $Q_{o_2}; R_{o_2}$ súlyozás

Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényeit a 14. ábrán látjuk, összehasonlítva a 10. ábrán láthatóakkal elmondható, hogy a szabályozási folyamatok gyorsabbak lettek ($t_{tr} \approx 2 \text{ sec}$), és lengési hajlama nőtt. A statikus hiba továbbra is 0° .



14. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényei $Q_{o_2}; R_{o_2}$ esetén

A 11. ábrán látható bedöntési szög átmeneti függvényeit összevetve a 15. ábrán láthatóakkal, elmondható, hogy a maximális értékét ($\gamma_{\max} = 1^\circ$) a repülési sebességtől függetlenül mindkét vizsgált esetben túlszabályozás nélkül éri el. A $Q_{o_2}; R_{o_2}$ súlyozás esetén a tranziens idő csökkent, melynek értéke $t_{tr} \approx 1,6 \text{ sec}$. A 15. ábra alapján megállapítható, hogy a repülési sebesség változása érdemben nem változtatja meg a dőlési szög átmeneti függvényét. A statikus hiba 0° .



15. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvényei, Q_{o_2} ; R_{o_2} súlyozás

A 4. táblázatban olvasható, hogy a repülőgép oldalirányú mozgását leíró egyenletek a vizsgált üzemmódokon negatív valóstengelyen elhelyezkedő pólussal rendelkeznek. A ξ csillapítási tényező értéke a repülési sebességtől függetlenül egységnyi.

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlendégek körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-26,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	26,1
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-36,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	36,4
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-48,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	48,4
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-62,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	62,1
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,87	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,87
-77,5	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	77,5

4. táblázat. Oldalirányú mozgás minőségi jellemzői, Q_{o_2} , R_{o_2} súlyozások

Összehasonlítva a 2. táblázatban szereplő minőségi jellemzőkkel elmondható, hogy a csillapítási tényező értéke nem változott, a sajátértékek abszolút értéke nőtt. Az

eredményeket összevetve a 1. táblázatban megfogalmazott irányítástechnikai minőségi paraméterekkel, elmondható, hogy a 3. táblázatban szerelő értékek megfelelnek a követelményeknek.

A heurisztikus hangolás után a $-0,992$, $-0,997$ pólusokat sikerült áthelyezni $-1,86$, $-1,87$ pontokba, de a bedöntési szög változása továbbra is lassú.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok eredményeként megállapítottuk, hogy az egységnyi súlyozásos LQR tervezési módszer alkalmazása a minőségi jellemzők tekintetében megfelelő rendszer tervezését tette lehetővé. A gyakorlatban a zárt szabályozási rendszerek számára olyan szabályozót igyekeznek tervezni, amely biztosítja a domináns póluspár hatásának érvényesülését, ezért célszerű olyan szabályozó tervezési módszert választani, vagy a korábban alkalmazottat olyanra módosítani, amely lehetővé teszi a szabályozó minimális lépésben történő megtervezését.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Csáki F.: Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- [2] Tuschák R.: Szabályozástechnika 1. füzet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1993.
- [3] SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.
- [4] Szabolcsi R.—Szegedi P.: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki tudományos konferencia MTESZ, Szolnok 2002. nov. 06. (CD-ROM).
- [5] MIL–C–18244A (AS) Control and stabilization system: automatic, piloted aircraft general specification for, 1992.
- [6] MIL–F–8785C Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [7] MIL–F–9490D Flight Control Systems – Design, Installation and test of piloted aircraft general specification for, 1993.
- [8] Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB® (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [9] Tuschák, R. Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
- [10] Helm, L. – Marton, J. A szabályozástechnika elméleti alapjai (lineáris rendszerek) II. rész, kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1965.
- [11] Peled, A. Advanced technologies and Approaches for next generation UAVs, ROBOT WARFARE 2, Conference, NDU, Budapest, 27.–28. 11. 2002.
- [12] Fodor, Gy. Lineáris rendszerek analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [13] Ogata, K. Designing Linear Control Systems with MATLAB®, Prentice-Hall, International Inc., 1994.
- [14] Nelson, R. C. Flight Stability and Automatic Control, WCB McGraw-Hill, 1998.
- [15] Somló, J. – Pham Thuong Cat Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
- [16] Szabolcsi, R. – Gáspár, P. – Pokorádi, L. Robust controller synthesis for the high maneuverable fighter aircraft, 21th Congress of International Council of the

Aeronautical Sciences, Melbourne, Australia, Presented in the Poster Session of the Conference, 1998.

[17] McLean, D. Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, New York, 1990.

[18] Szegedi, P. A pilóta nélküli repülőgépek irányíthatóságának és megfigyelhetőségének vizsgálata, Repüléstudományi Közlemények XIV. évfolyam 34. szám, (129–150), Szolnok, 2003.

PRELIMINARY DESIGN OF A CLOSED LOOP SYSTEM STABILIZING STATE VARIABLES OF THE LATERAL MOTION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

In the article are shown results of the analysis made on the flight-mechanical mathematical models of the unmanned aerial vehicle (UAV) „Szojka-III”. Analysis was done on the vehicle flying on a state level (400 m) with a state mass ($m=135$ kg) and at different speeds (110, 130, 150, 170, 190 km/h).