

## **PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERÉNEK FREKVENCIA TARTOMÁNYBELI VIZSGÁLATA**

A cikkben a Szojka-III pilótánélküli repülőgép — [1] szakirodalomból rendelkezésre álló matematikai modelljei, és heurisztikusan hangolt szabályozók (állapot—visszacsatolási mátrixok) felhasználásával meghatározott repülésszabályozó rendszer — frekvencia tartománybeli vizsgálatainak eredményeit mutatják be a szerzők.

### **BEVEZETÉS**

A jelenkor biztonsági követelményeinek megfelelően a Magyar Honvédség átalakításával feladatrendszere is változik. A megváltozott biztonságpolitikai helyzetben, a régi kötelezettségek mellett, a Magyar Honvédség alapvető feladata, a haza katonai védelme mellett, hogy eleget tegyen a XXI. század biztonságát fenyegető kihívásoknak. A haderő kialakítása folyamán olyan a lehetőségeket keresünk, amelyek az új elvárásoknak megfelelő, de mégis megfizethető megoldásokat jelenthetnek.

A Magyar Honvédség légierejének feladatai között szerepelnek olyan feladatok, mint például légi felderítés, megfigyelés, harcmezőről történő valós idejű információszerzés, rendszerek elektromágneses kisugárzásának felderítésére, vegyi- és sugárfelderítő vagy aknamező felderítő feladatok végrehajtása, földi és légi célok megsemmisítése vagy légi célok imitálása. A feladatok sokrétősége egy olyan speciális eszköz alkalmazását teszi szükségessé, amely bevetés után, rövid idejű átalakítással (megfelelő konténerek cseréje) az új harc feladat sajátosságainak megfelelően, átfegyverezhető, gyorsan újra bevethető. A pilóta nélküli repülőgépek ilyen eszközök, (a rajtuk elhelyezhető fedélzeti hasznos terhelések függvényében) katonai, és nem katonai feladatok széles spektrumát képesek ellátni.

A pilóta nélküli repülőgépek irányításához jól képzett szakszemélyzetre, vagy előre, a repülés megkezdése előtt a földön, illetve repülés közben a robotpilótába programozott útvonaltervre van szükség. A földön, irányító állomáson, vagy a startpont közelében lévő irányító személy, fedélzeti kamera nélkül, megfelelő látási és időjárás viszonyok között, csak a látóhatár széléig, képes a repülőgép irányítására. A repülőgép üzemeltetési határai növelésének egy lehetséges megoldása robotpilóta (repülésszabályozó) alkalmazása. A repülésszabályozó

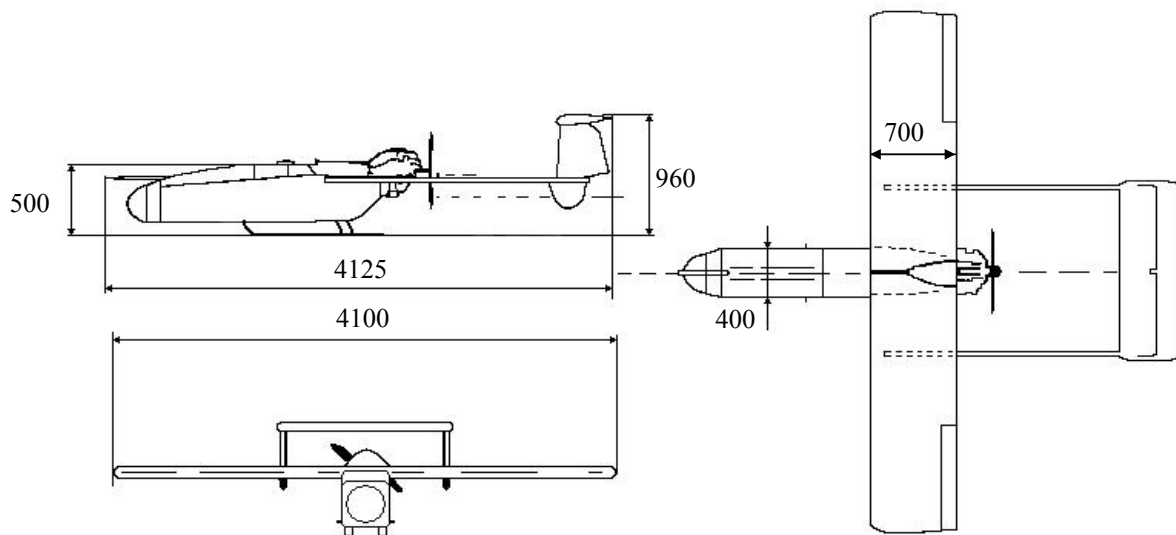
tervezésének alapkövetelménye, hogy – a rendelkezésre álló dinamikus modellek állapotegyenleteit felhasználva – megismerjük a szabályozott berendezés működési tulajdonságait. A megismert és kiértékelt képességek birtokában eldönthető, hogy az eszköz bevethető, vagy további fejlesztésre szorul, vagy az elvárt képességeknek nincs a birtokában.

## A SZOJKA-III PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉP-KOMPLEXUM

A Szojka–III pilóta nélküli merev szárnyú, kis méretű és súlyú, elsősorban harcászati szintű felderítési feladatok megoldására alkalmas repülőeszköz, az 1. ábrán látható, ami használható különböző katasztrófavhelyzetekben felderítési feladatok ellátására is.

A Szojka–III repülőgép-komplexum négy önálló szállítási egységből áll:

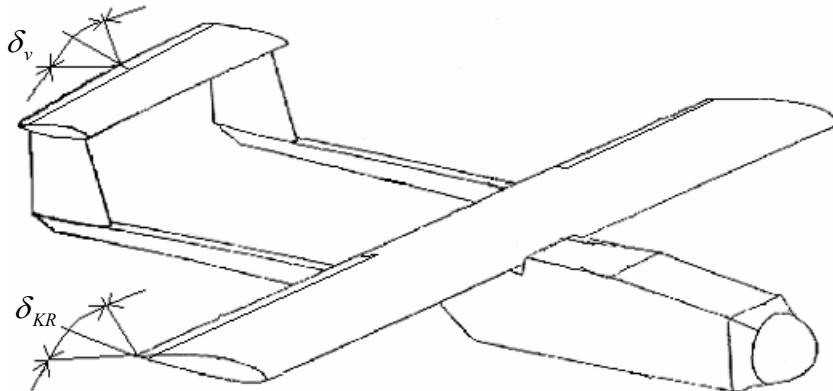
- Indító-gépjármű (a gépjárművön található a 12 m hosszú indítószín, egy kisméretű daru, egy 220V/50 Hz-es áramfejlesztő generátor, az indításhoz szükséges elektronikus vezérlő berendezések, illetve a szélesség és széliránymérő rendszer);
- földi irányítóállomás (tartalmazza a repülési feladat végrehajtásához, illetve a felderítési tevékenység irányításához és az információk kiértékeléséhez szükséges berendezéseket);
- műszaki mentő gépjármű;
- műszaki kiszolgáló gépjármű.



1. ábra A Szojka-III pilótanélküli repülőgép háromnézeti rajza

A pilótanélküli repülőgép a test koordináta-rendszer három tengelye körül kormányozható a magassági kormány  $\delta_v$  szögkitérése által (a kereszt-tengely körüli bólintó mozgást

eredményezi), és a csűrőlapok  $\delta_{KR}$  szögkitérése által (hossztengely körüli forgó (orsózó) mozgást hozza létre) létesített nyomatékok hatására, 2. ábra. Az oldalkormányt nem alakították ki, és repülés közben a hajtómű üzemállapota sem szabályozható. A repülőgép alapvetően kis magasságon, alacsony repülési sebességgel végrehajtott távirányított repüléseket végez. A repülőgép méreteit, tehetetlenségi nyomatékait, a statikus stabilitási tényezőket, valamint a dinamikus modellek állapotegyenleteit az [1] szakirodalom tartalmazza.



2. ábra A Szojka-III pilótánélküli repülőgép

## A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP MODELLJE

A Szojka—III dinamikája (1) alakban a [1] irodalom alapján adott.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}; \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (1)$$

A repülőgép mozgásának vizsgált állapotvektorai hosszirányú mozgás esetén (2), oldalirányú mozgás esetén (3) alakúak.

$$\mathbf{x}_h^T = [\vartheta \quad H \quad \omega_z] \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_o^T = [\omega_x \quad \gamma] \quad (3)$$

A repülőgép a magassági kormány és a csűrőlapok segítségével kormányozható, a szögkitérésekkel arányos jelek, mint bemeneti paraméterek értelmezhetők:

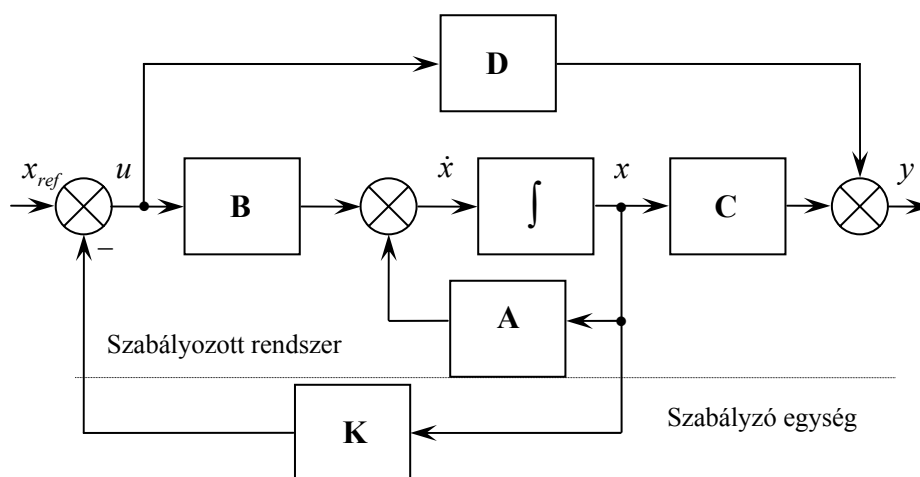
$$\mathbf{u}_m = [\delta_v] \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_o = [\delta_{KR}] \quad (5)$$

Az optimális vezérlési törvény  $x_{ref.} = 0$ , és  $\mathbf{D} = 0$  esetén:

$$\mathbf{u}_{opt}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (6)$$

alakú, és a szabályozási rendszer a 8. ábrán látható. A (6) egyenletben a  $\mathbf{K}$  az állapot–visszacsatolási mátrix [15, 16].



8. ábra A teljes állapot–visszacsatolású szabályozási rendszer

Az analíziseket a [1] irodalomban megtalálható matematikai modellek segítségével, az (1) táblázat szerinti repülési üzemmódokon lettek elvégezve.

	Repülési üzemmódok									
	Hosszirányú mozgás					Oldalirányú mozgás				
Repülési sebesség $v = [km/h]$	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.
	110	130	150	170	190	110	130	150	170	190
Repülési magasság	$H = 400 [m]$									
Felszálló tömeg	$m = 135 [kg]$									

1 táblázat: A Szojka–III repülőgép vizsgált repülési üzemmódjai

Az elvégzett irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálat eredménye [2], a Kalman féle rang feltétel alapján, hogy a repülőgép hosszirányú és oldalirányú mozgásának összes vizsgált állapota a rendelkezésre álló bemeneti paraméterekkel irányítható, és minden állapotváltozója megfigyelhető. Tehát a Szojka–III pilótánélküli repülőgép a kiépítésre került kormányzerveivel, előre definiált, térbeli mozgásra képes. A repülőgép mozgásjellemzőinek ( $v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) változása visszavezethető a kormányfelületek kitérése által keltett nyomatékváltozásokra [1, 2, 3].

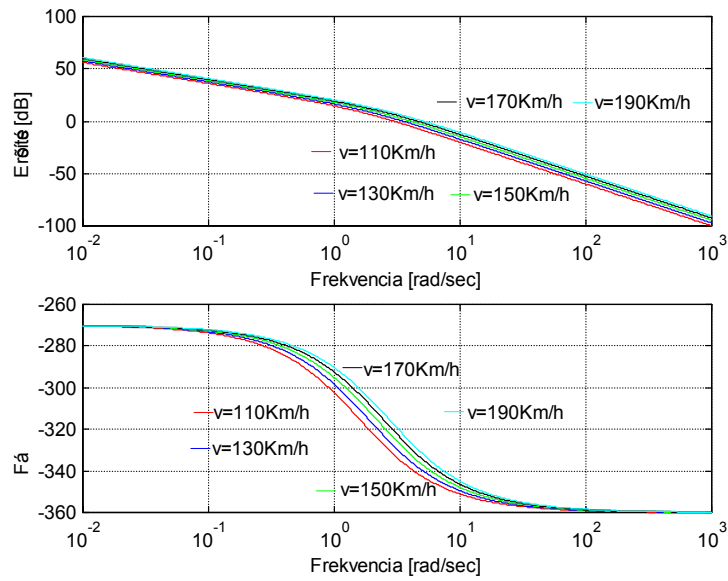
## A NEMIRÁNYÍTOTT PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP ANALÍZISE

A stabilis működés feltételei az időtartomány helyett sok esetben előnyösebben tisztázhatók a frekvencia tartományban. A komplex frekvenciafüggvények ábrázolására több módszer ismert. A frekvencia diagram legkönnyebben kezelhető formája a Bode–diagram. A számítógépes vizsgálati módszerek alkalmazásával sem csökkent a szerepe, könnyen meghatározható, és szemléletes. A Bode kritérium (mivel egyszerű és áttekinthető) segíti a tervezési koncepció kialakítását. A frekvenciatartománybeli vizsgálatok során a rendszereket állandó amplitúdójú, változó frekvenciájú vizsgálójellel gerjesztjük.

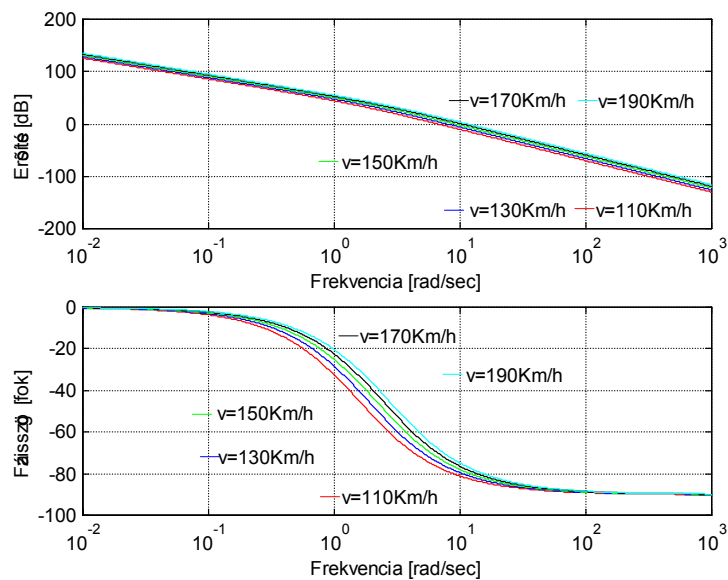
A repülőgépet térbeli mozgása során a frekvenciatartományban jól leírható külső és nagyfrekvenciás belső zavaró jelek gerjesztik. A fellépő külső és belső zajok repülőgépre gyakorolt hatását ismernünk kell, hogy a megfelelő minőségi jellemzőket biztosító szabályozási rendszert megtervezhessük [3, 5, 6, 7].

A rendszer akkor stabilis, ha a felnyitott kör Bode–diagramjában az amplitúdó görbe olyan vágási frekvencián metszi az egységnyi erősítésű tengelyt, amelynél a fázistöbblet pozitív. (Bode kritérium) [6, 7].

A vizsgált nemirányított repülőgép hosszirányú mozgásjellemzőinek Bode–diagramjai a 2.; 3.; 4. ábrákon láthatók. A 3. ábráról leolvasható, hogy a bólintási szög Bode–diagramja a repülési sebességtől csak kismértékben függ. Az erősítés monoton csökkenő jellegű.

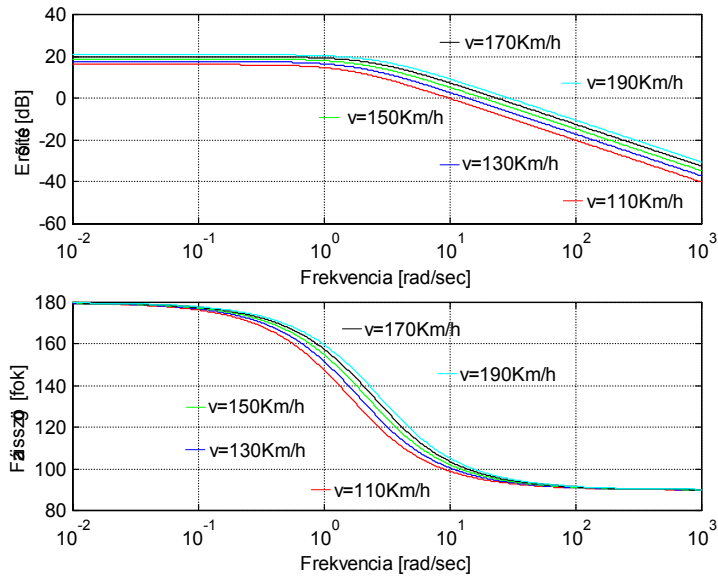


3. ábra A bólintási szög Bode-diagramja



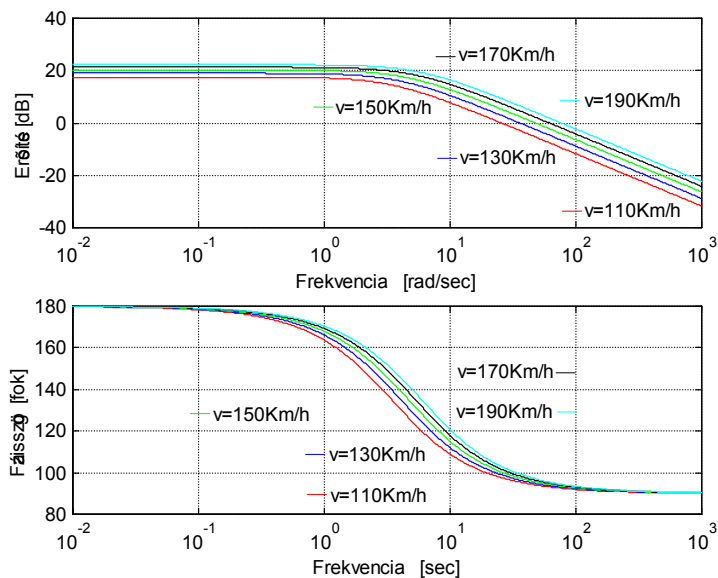
4. ábra A magasság Bode-diagramja

A 4. ábrán látható, hogy a magasságváltozás amplitúdó karakterisztikája a frekvencia növekedésével, a vizsgált tartományon monoton csökkenő, a repülési sebesség növekedésével kismértékben nő az erősítés értéke. A 5. ábrán a bólintási szög Bode-diagramja látható. Az erősítés a kis frekvenciás tartományon konstans, a törésponti frekvenciától nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő jellegű.

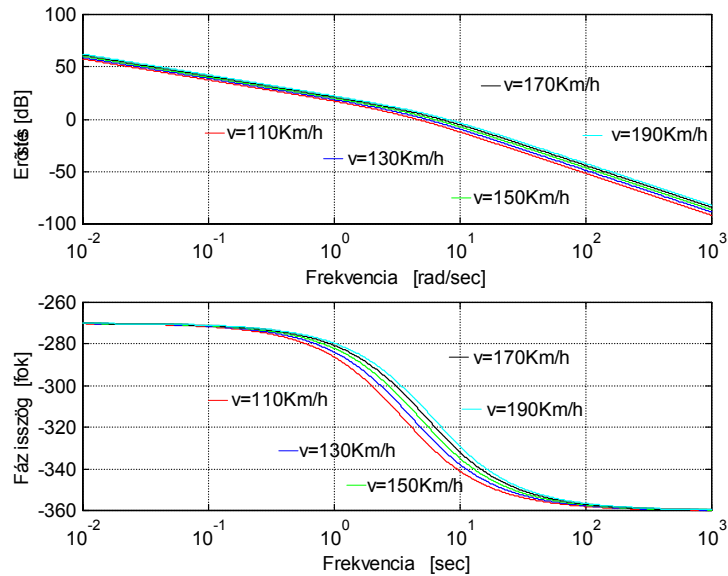


5. ábra A bólintási szög Bode-diagramja

A 6. és a 7. ábrákon a nemirányított repülőgép oldalirányú mozgás állapotváltozóinak Bode-diagramjait láthatjuk. A 6. ábrán az orsózó szögsebesség frekvencia menetét vizsgálhatjuk. Az amplitúdó karakterisztika kisfrekvencián 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 az előzőekben vizsgált többi repülési jellemzőhöz hasonlóan egytárolós jelleget mutat.



6. ábra Az orsózó szögsebesség Bode-diagramja



7. ábra A bedöntési szög Bode–diagramja

A 7. ábrán a bedöntési szög amplitúdó– és fázis karakterisztikája látható. A karakterisztikák kisméretű tartományban a repülési sebességtől függetlenül együtt futnak.

A térbeli mozgás állapotváltozóinak minőségi jellemzői lényegében nem függenek a repülési sebességtől. Az amplitúdó– és a fázistartalék az összes vizsgált repülési üzemmódon nulla. A Szojka–III pilótánélküli repülőgép repülésszabályozó rendszere a vizsgált üzemmódokon stabilis, de csillapító automatával ellátott zárt szabályozási rendszer megtervezése indokolt és szükséges [5, 6, 7, 8, 9, 10].

## SZABÁLYOZÓ EGYSÉG TERVEZÉSE LQR MÓDSZERREL

Az LQR szabályzó tervezési módszer feltételezi, hogy a rendszert nem gerjeszti sem külső, sem belső zavarforrás, és az összes állapotváltozója ismert, vagy mérhető. A tervezés folyamán keressük az optimális vezérlési törvényt, amely a lineáris rendszert egyik egyensúlyi állapotából a másikba viszi át a költségfüggvény minimalizálásával [4, 17, 18]:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \rightarrow \min \quad (7)$$

A költségfüggvény (7) lokális minimalizálásához szükséges definiálnunk a  $\mathbf{Q}$  és  $\mathbf{R}$  mátrixokat. Segítségükkel meghatározhatjuk az optimális vezérlési törvényt (6), és  $\mathbf{K}$  optimális állapot–visszacsatolási mátrixot.

Legyen a rendszer referencia jele  $x_{ref.} = 0$ , az előre vezetési mátrix  $\mathbf{D} = 0$ .



A hangolt rendszer állapot–visszacsatolási mátrixai, hosszirányú mozgás  $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{R} = 1$  súlyozások esetén:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{h1} &= [-4,1054 \quad -0,2236 \quad -1,0034] \\ \mathbf{K}_{h2} &= [-4,2605 \quad -0,2236 \quad -0,9294] \\ \mathbf{K}_{h3} &= [-4,4192 \quad -0,2236 \quad -0,8794] \\ \mathbf{K}_{h4} &= [-4,579 \quad -0,2236 \quad -0,844] \\ \mathbf{K}_{h5} &= [-4,7384 \quad -0,2236 \quad -0,8181] \end{aligned} \quad (8)$$

## SZABÁLYOZÓ EGYSÉG TERVEZÉSE PÓLUS ÁTHELYEZÉS MÓDSZERREL

A korszerű, állapottér tervezési módszerek közé tartozik a pólus áthelyezés módszer. A nyitott szabályozási rendszer továbbra is (1) alakban adott. A rendszer teljesen irányítható és megfigyelhető. A módszer lényege egy olyan szabályozó tervezése, ami biztosítja, a zárt rendszer előírt működési tartományán belüli stabilis működést. A vezérlési törvényt (6) alakú, vagyis a pillanatnyi állapotot az irányítójel határozza meg. A  $\mathbf{K}$  állapot–visszacsatolási mátrix megválasztásával biztosíthatjuk, hogy a zárt rendszer pólusai a komplex sík baloldálára, a kívánt helyre, a  $p = (-1 \pm j)$  kerüljenek.

A vezérlési törvényt (6) behelyettesítve a (1) egyenletbe kapjuk a zárt rendszer állapotegyenletét:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) \quad (9)$$

Legyen  $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{BK}$ , akkor a karakterisztikus egyenlet:

$$\begin{aligned} \Phi_s &= |s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}| = (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot \dots \cdot (s - s_n) = \\ &= s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

és

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + \alpha_1 \mathbf{A}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \mathbf{A} + \alpha_n \mathbf{I} \quad (11)$$

A Cayley–Hamilton tétel alapján egy  $n - ed$  rendű kvadratikus mátrix  $m \geq n$  hatványa kifejezhető a  $k < n$  hatványok lineáris kombinációjaként [19, 20]:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \tilde{\mathbf{A}}^n + \alpha_1 \tilde{\mathbf{A}}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \tilde{\mathbf{A}} + \alpha_n \mathbf{I} = 0 \quad (12)$$

$n = 3$  közelítést alkalmazva:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \Phi(\mathbf{A}) - \alpha_2 \mathbf{BK} - \alpha_1 \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}}^2 - \alpha_1 \mathbf{ABK} - \mathbf{ABK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{A}^2 \mathbf{BK} \quad (13)$$

$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = 0$ , így:

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{B}(\alpha_2 \mathbf{K} + \alpha_1 \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}^2) + \mathbf{A}\mathbf{B}(\alpha_1 \mathbf{K} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}) + \mathbf{A}^2 \mathbf{B}\mathbf{K} \quad (14)$$

A (14) egyenletből kifejezhető a  $\mathbf{K}$  állapot–visszacsatolási mátrix:

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2 \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (15)$$

Tetszőlegesen választott  $n$  esetén a  $\mathbf{K}$  állapot–visszacsatolási mátrix [10, 18, 20]:

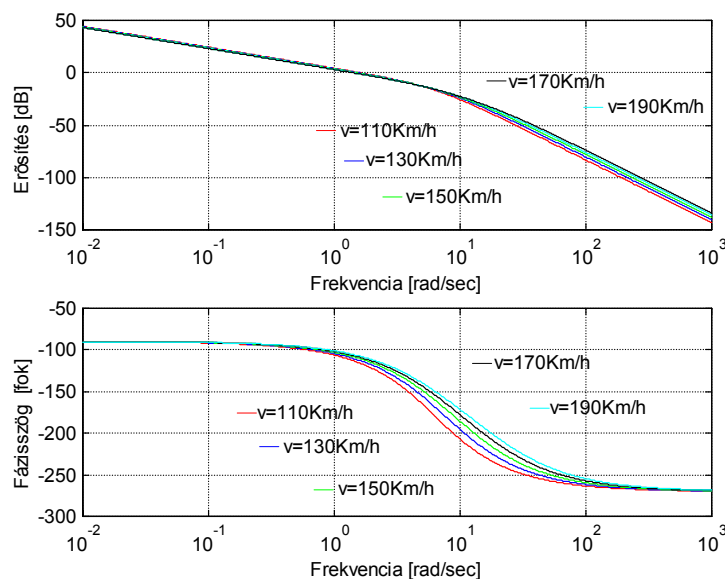
$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1} \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (16)$$

Az állapot–visszacsatolási mátrix oldal irányú mozgás esetén:

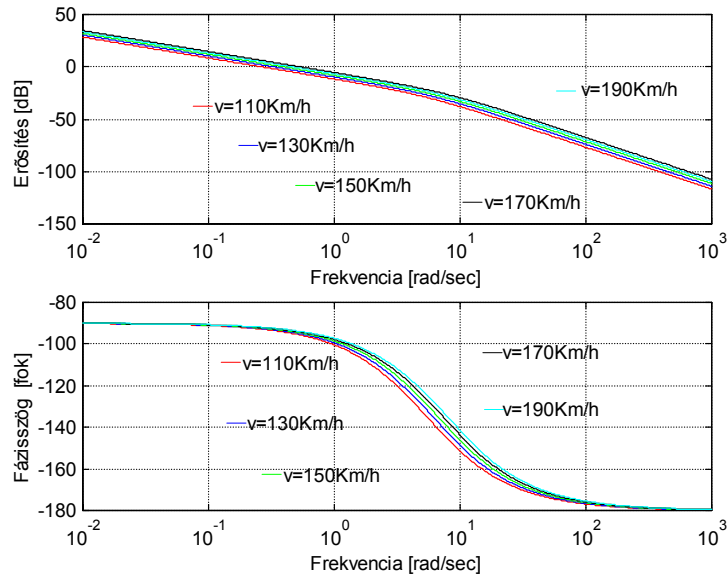
$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o1} &= [0,0556 \quad -0,0772] \\ \mathbf{K}_{o2} &= [0,0571 \quad -0,0552] \\ \mathbf{K}_{o3} &= [0,0559 \quad -0,0415] \\ \mathbf{K}_{o4} &= [0,0536 \quad -0,0323] \\ \mathbf{K}_{o5} &= [0,051 \quad -0,0259] \end{aligned} \quad (17)$$

## A FELNYITOTT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER ANALÍZISE FREKVENCIATARTOMÁNYBAN

A felnyitott szabályozási kört vizsgálva az erősítés–körfrekvencia jelleggörbéket, 9.; 10. ábrák, két részre bonthatjuk. Kisfrekvenciás tartomány  $\sim 10 \text{ rad/sec}$ -ig, a bemeneti jelek tartománya, a rendszer mindent áteresztő jellegű, a bemeneti jelek korlátos erősítéssel jutnak át a rendszeren.



9. A felnyitott rendszer Bode–diagramja, hosszirányú mozgás



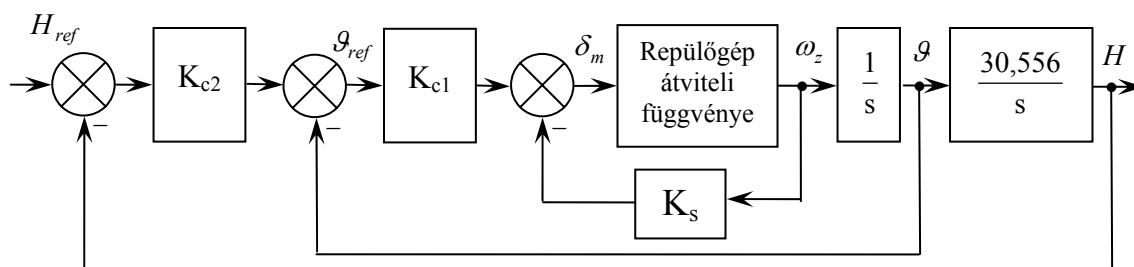
10. ábra A felnyitott rendszer Bode-diagramja, oldalirányú mozgás

Nagyfrekvenciás tartományban, amely tipikusan az érzékelők mérési zajának tartománya, a rendszer csillapítása folyamatosan nő, szűrve a rendszerre ható zajokat. A rendszer amplitúdó-, és fázistartaléka a 2. táblázatban látható.

A felnyitott rendszer amplitúdó- ( $G_m$ ) és fázistartaléka ( $\varphi_m$ )				
Repülési sebesség $v = \left[ \frac{km}{h} \right]$	Hosszirányú mozgás		Oldalirányú mozgás	
	$G_m$ [dB]	$\varphi_m$ [fok]	$G_m$ [dB]	$\varphi_m$ [fok]
110	16,862	64,272	$\infty$	87,217
130	19,318	68,064	$\infty$	86,874
150	21,55	70,841	$\infty$	86,582
170	23,594	72,968	$\infty$	86,33
190	25,481	74,656	$\infty$	86,111

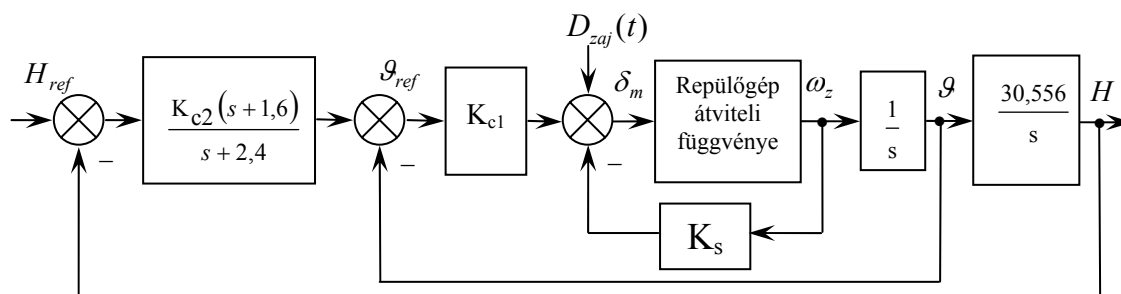
2. táblázat: A felnyitott rendszer amplitúdó-, és fázistartaléka

A [12, 13, 14] szakirodalmakban megfogalmazott minőségi követelményeket teljesíti a szabályozott rendszer, 11. ábra.



11. ábra A szabályozott rendszer

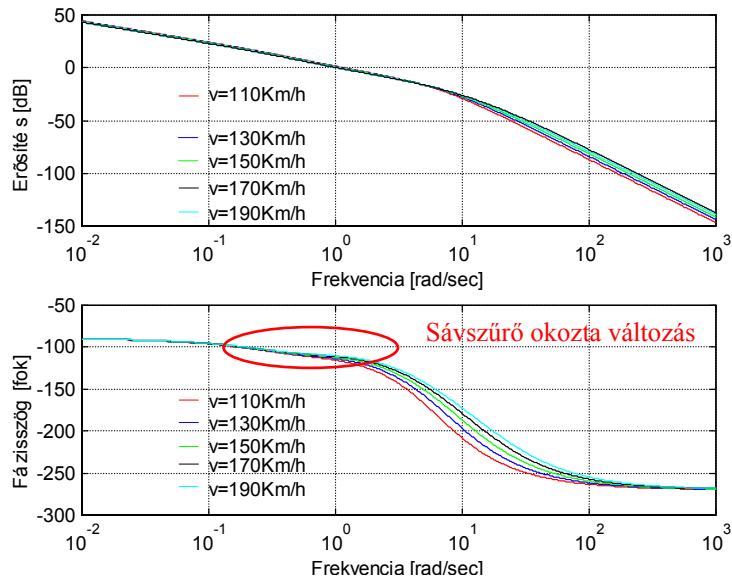
A további vizsgálatokhoz szűrjük a  $K_{c2}$  erősítőbe érkező jeleket a 12. ábrán látható módon, vagyis legyen a  $\mathbf{K} = [K_{c1} \quad K_{c1}K_{c2} \quad K_s]$  állapot-visszacsatolási mátrix alapján adott P típusú  $K_{c2}$  erősítő a zavaró jelek szűrése érdekében PDT1 típusú.



12. ábra Zavarszűrés a magasság szabályozó rendszerben

## A SOROS KOMPENZÁTOROS FELNYITOTT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER ANALÍZISE FREKVENCIATARTOMÁNYBAN

Összehasonlítva a hosszirányú mozgás 8. ábrán látható Bode-diagramját a 13. ábrán látható, frekvenciamenet görbével, az amplitúdó karakterisztikán az eltérés nem szembetűnő, de a fáziskarakterisztikán az előszűrő okozta változás jól megfigyelhető.



13. ábra A soros kompenzátoros szabályozási rendszer tranziens viselkedése

Az 2. táblázatot összevetve a 3. táblázattal, elmondható, hogy a sávszűrő alkalmazása a rendszer amplitúdótartalékait növelte, míg a fázistartalékait csökkentette.

A felnyitott rendszer amplitúdó- ( $G_m$ ) és fázistartaléka ( $\varphi_m$ )		
Repülési sebesség $v = \left[ \frac{km}{h} \right]$	Hosszirányú mozgás	
	$G_m$ [dB]	$\varphi_m$ [fok]
110	19,841	62,705
130	22,366	65,267
150	24,646	67,097
170	26,728	68,463
190	28,644	69,517

3. táblázat: A soros kompenzátoros felnyitott rendszer amplitúdó-, és fázistartaléka

## KÖVETKEZTETÉSEK

A szerzők elvégezték a Szojka—III repülőgép hosszirányú és oldalirányú mozgásának számítógépes analizisét. A frekvenciatartománybeli vizsgálatok eredményeként elmondható:

- a nemirányított repülőgép állapotváltozóinak minőségi jellemzői a repülési sebességtől csak kismértékben függenek;

- a nemirányított repülőgép átviteli függvényének amplitúdó- és a fázistartalék az összes vizsgált repülési üzemmódon nulla, nem felel meg a [12, 13, 14] szakirodalmakban előírt minőségi követelményeknek;
- a Szojka–III pilótánélküli repülőgép repülésszabályozó rendszere a vizsgált üzemmódokon stabilis, de csillapító automatával ellátott zárt szabályozási rendszer megtervezése indokolt és szükséges;
- a szabályozott rendszer [12, 13, 14] szakirodalmakban megfogalmazott minőségi követelményeket teljesíti;
- a sávszűrő alkalmazása a magasság stabilizáló rendszer átviteli karakterisztikájának amplitúdótartalékait növelte, míg a fázistartalékait csökkentette, de az előírt minőségi követelményeket teljesíti.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1]. SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.
- [2]. Szegedi P.: „A Pilótánélküli Repülőgépek Irányíthatóságának és Megfigyelhetőségének Vizsgálata”, Repüléstudományi Közlemények, 2003/1. (129-150 oldal).
- [3]. Szabolcsi R.—Szegedi P.: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki tudománynapi konferencia MTESZ, Szolnok 2002. nov. 06. (CD-ROM).
- [4]. Szabolcsi R.—Szegedi P.: Pilótánélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének előzetes méretezése, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Tudományos konferencia, Repüléstudományi Közlemények Elektronikus különszáma (CD mellékleten), Szolnok, 2005 04. 15.
- [5]. Helm L.—Marton J.: A szabályozástechnika elméleti alapjai (lineáris rendszerek) II. rész, kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1965.
- [6]. Somló, J. – Pham Thuong Cat: Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
- [7]. Tuschák, R. Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
- [8]. Chiang, R. Y. – Safonov, M. G. MATLAB® Robust Control Toolbox, User's Guide (version 2), The MathWorks, Inc., 1996.
- [9]. Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB® (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [10]. Szabolcsi, R. A MATLAB® programozása, Egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
- [11]. Pilóta nélküli felderítő repülő eszközök. Haditechnikai Intézet, Haditechnika füzetek 1.sz 1999.
- [12]. MIL–C–18244A (AS) Control and stabilization system: automatic, piloted aircraft general specification for, 1992.
- [13]. MIL–F–8785C Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [14]. MIL–F–9490D Flight Control Systems – Design, Installation and test of piloted aircraft general specification for, 1993.
- [15]. Hangos, K. – Bokor, J. – Szederkényi, G. Computer controlled systems, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2002.
- [16]. McLean, D.: Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, International Ltd, 1990.
- [17]. Nelson, R. C. Flight Stability and Automatic Control, WCB McGraw–Hill, 1998.
- [18]. Szabolcsi, R. Szabályozástechnikai feladatok megoldása a MATLAB® alkalmazásával, Egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
- [19]. Ogata, K. Modern Control Engineering, Prentice–Hall International Ltd., 1990.
- [20]. Fenyő, I. – Frey, T. Matematika villamosmérnököknek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.