

Szegedi Péter

A SZOJKA–III NEMIRÁNYÍTOTT REPÜLŐGÉP ANALÍZISE

A cikkben a Szojka–III pilótánélküli repülőgép — [5] szakirodalomból rendelkezésre álló repülésmechanikai matematikai modelljei idő- és frekvencia tartománybeli vizsgálatainak eredményeit mutatja be a szerző. A vizsgálatokat állandó tömegű ($m=135$ kg), állandó magasságon (400 m), 110, 130, 150, 170, 190 km/h sebességgel repülő repülőgépre terjesztette ki, és MATLAB[®] környezetben futtatott, előre megírt program segítségével végezte.

BEVEZETÉS

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 harcfeladat sajátosságainak megfelelően, átfegyverezhető és gyorsan újra bevethető. A pilóta nélküli repülők ilyen eszközök, (a rajtuk elhelyezhető fedélzeti hasznos terhelések függvényében) katonai, és nem katonai feladatok széles spektrumát képesek ellátni.

Jelenleg a Magyar Honvédségben nincs rendszeresítve pilóta nélküli repülőeszköz. Ez azt is jelentheti, hogy a felsorolt feladatok nem, vagy csak részben megkérdőjelezhető hatásokkal, illetve nem optimális költség ráfordítással vannak biztosítva.

1988-ban kezdődött magyar–cseh fejlesztés eredményeként megépült a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép. A repülőgép a 90-es éveknek megfelelő fejlettségű, alacsony költségvetéssel (150 millió forint) fejlesztett robotrepülői közé tartozik. Felhasználási lehetőségeit és üzemeltetését tekintve viszonylag egyszerű és olcsó eszköz. Sokoldalú hasznos terhei révén jól alkalmazható lenne az előzőekben felsorolt feladatok részleges, vagy akár teljes ellátására [7].

A mintegy 20 kg hasznos teher szállítására képes repülőgép irányító rendszerének „felhasználó barátta” alakítása lehetőséget teremt a repülőgép egyszerű repültetésére. A repülőgép robotpilóta rendszerének korszerűsítése után, a mai kor kis költségvetésű haderejében rendszerbe állítható, és mint egy többcélúan felhasználható repülőeszköz állhatna bevetésre készen a Magyar Honvédség, Katasztrófavédelem, vagy a Határőrség számára.

A SZOJKA–III PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP-KOMPLEXUM

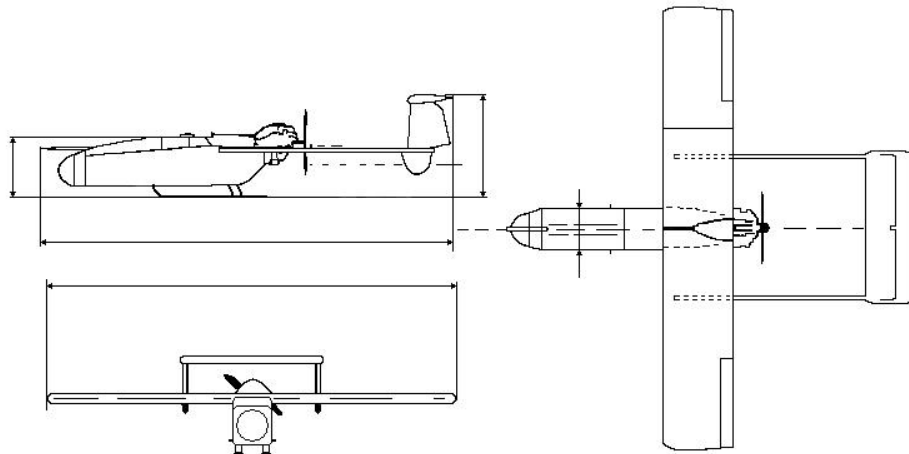
A Szojka–III repülőgép-komplexum négy önálló szállítási egységből áll:

- Indító-gépjármű (a gépjárművön található a 12 méter hosszú indítósín, egy kisméretű daru, egy 220V/50 Hz-es áramfejlesztő generátor, az indításhoz szükséges elektronikus vezérlő berendezések, illetve a szélesebesség 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.

A Szojka–III pilóta nélküli merev szárnyú, kisméretű és súlyú, elsősorban harcászati szintű felderítési feladatok megoldására alkalmas repülőeszköz (1. ábra), ami használható különböző katasztrófavhelyzetekben felderítői feladatok ellátására is.

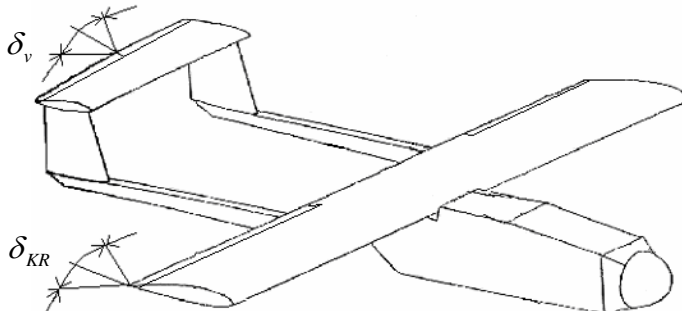
A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép lehetséges felhasználói a Magyar Honvédség mellett a Katasztrófavédelem, Határőrség, Rendőrség, illetve Tűzoltóság is.

A repülőgép alacsony magasságon (repülési tartománya 50–2000 m) kis repülési sebességgel (maximális sebessége 220 km/h) hajtja végre repülési feladatait. Teljes feltöltéssel maximum 3,5 órát képes a levegőben tartózkodni, hatósugara 150 km. Indítása indító-gépjárműről, 1 tonna tolóerejű startkapult berendezéssel, leszállítása ejtőernyővel történik, de a törzsre szerelt siklótalpra is képes leszállni. Irányítása mobil repülőtéren települt földi, vagy egy előretolt irányító állomásról, illetve a robotpilótába előzetesen betöltött útvonalprogram alapján történik. A hasznos teher a feladatvégrehajtás függvényében cserélhető. A hasznos teher tömege az üzemanyag mennyiségétől függően maximum 20 kg lehet [7]. Nappal, jó látási viszonyok között, és csak a látóhatár széléig lehet üzemeltetni biztonságosan.



1. ábra. A Szojka–III háromnézeti rajza

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép a test koordináta-rendszer három tengelye körül kormányozható a magassági kormány δ_v szögkitérése által (a kereszt-tengely körüli bólintó mozgást eredményezi), és a csűrőlapok δ_{KR} szögkitérése által (hossz-tengely körüli forgó (orsózó) mozgást hozza létre) létesített nyomatékok hatására. Az oldalkormányt nem alakították ki, és repülés közben a hajtómű üzemálla-pota sem szabályozható, vagyis a repülőgép alapvetően kis magasságon, alacsony repülé-si sebességgel végrehajtott távirányított repüléseket végez, 2. ábra [4].



2. ábra. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép

A SZOJKA–III PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP ANALÍZISE IDŐTARTOMÁNYBAN

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép, mint nemirányított szakasz minőségi jel-lemzőinek megismerése, és összevetése a robotpilóta rendszerekkel szemben

támasztott minőségi követelményekkel, lehetőséget teremt az előírt irányítás-technikai minőségi követelmények biztosításához és a szükséges szabályozó megtervezésére.

A robotpilótákkal szemben támasztott alapvető követelmény a megfelelő pontosságú alapjel-követés. A gyakorlatban a robotpilóta alapjel-követését az alábbi bemenő jelekre szokás vizsgálni [1, 2, 6, 17]:

- $x_a(t) = \delta(t)$, Dirac-delta impulzus – segítségével a rendszer súlyfüggvényét határozhatjuk meg, melyen keresztül a zárt szabályozási rendszer (repülőgép) stabilitását vizsgálhatjuk. A közvetlen stabilitási kritérium alapján a szabályozási rendszer akkor és csak akkor stabilis, ha (megfelelően hosszú idő elteltével) a súlyfüggvény értéke zérus, vagyis:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0 \quad (1)$$

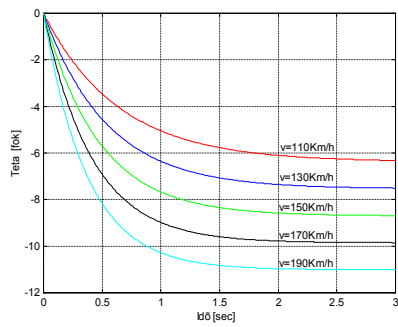
- $x_a(t) = 1(t)$, egységugrás jel – általa a rendszer átmeneti függvényét ismerhetjük meg. Gyors működésű kormányrendszerek esetén az egyes kormányfelületek meghibásodás miatt bekövetkező szögkitérés, valamint a pilóta által vezetett kiképző repülőgépek robotpilótája légi meghibásodásának imitálása során, az egyes kormányfelületeken létrehozott szögkitérések jó közelítéssel egységugrás jellegűeknek tekinthetők. A valós kormányrendszerekben az időkéscés 0,02–0,05 másodperc, amely elhanyagolhatóan kis értékű a zárt szabályozási rendszerek több másodperces tranziens idejéhez képest.

A robotpilóta zárt szabályozási rendszerének irányítástechnikai minőségi jellemzőit az átmeneti függvényből szokás származtatni. Ha a vizsgált jellemző az átmeneti folyamat lezajlása után egy új állandósult állapotnak megfelelő értéket vesz fel, vagyis:

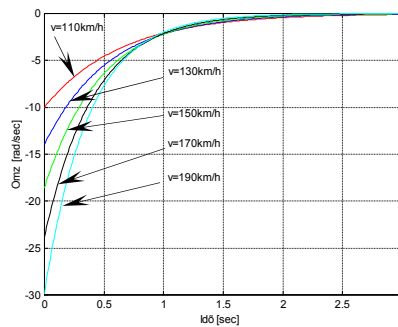
$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = konst, \quad (2)$$

akkor a zárt szabályozási rendszer stabil [18].

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép hosszirányú nemirányított mozgása súlyfüggvényeinek meghatározásakor a repülőgép bemeneti jele legyen a magassági kormány Dirac-impulzus jellegű kitérítése. A repülőgép kimeneti válasz jelei, pedig a hosszirányú mozgás (\mathcal{G}, H, ω_z) állapotváltozói. Az állapotváltozók repülési sebességben paraméterezett súlyfüggvényei a 3., 4., 5. ábrákon láthatók.

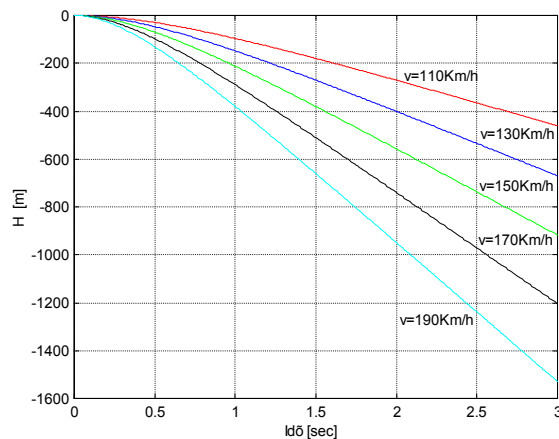


3. ábra. A bólintási szög impulzusválasz függvénye



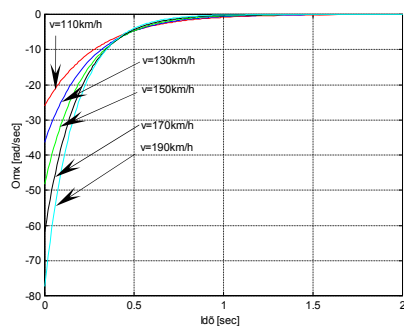
4. ábra. A bólintási szögsebesség impulzusválasz függvénye

A 3. ábrán látható, hogy a vizsgált repülési üzemmódokon a nemirányított rendszer válasza a Dirac-impulzus gerjesztésre kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség növekedésével a stacioner állapot abszolút értéke nő. A 4. ábrán az impulzus válasz függvény transziens folyamata exponenciális, majd $t \rightarrow \infty$ estén a repülési sebesség értékétől függetlenül zérushoz tart. Az 5. ábrán a repülési magasság súlyfüggvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan szét tartóvá válnak, vagyis a repülőgép egyensúlyi helyzetéből kitér, és oda nem tér vissza.

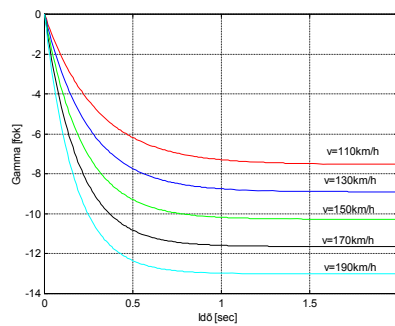


5. ábra. A magasság impulzusválasz függvénye

A vizsgált repülőgép nem irányított oldalirányú mozgása (ω_x, γ) állapotváltozók transziens analízise során a repülőgép bemeneti jele legyen csűrőlapok Dirac-impulzus jellegű kitérítése. A mozgás állapotváltozók viselkedése a 6. és a 7. ábrákon látható.



6. ábra. Az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye

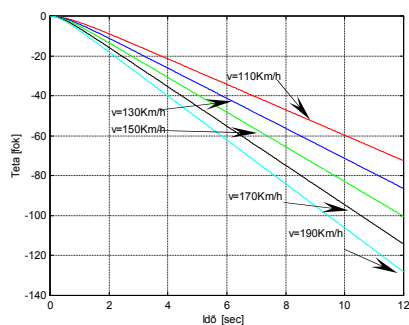


7. ábra. A bedöntési szög impulzusválasz függvénye

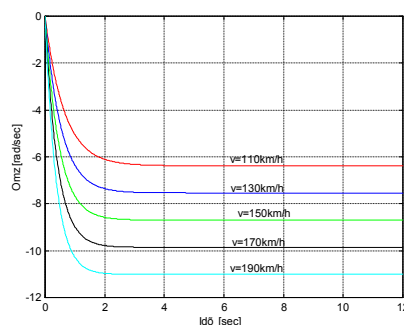
A 6. ábráról leolvasható, hogy az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ estén minden vizsgált üzemmódon zérushoz tart. A 7. ábrán a nemirányított rendszer válasza a Dirac-impulzus gerjesztésre kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség függvényében konstans értékre áll be.

A továbbiakban a Szojka–III repülőgép átmeneti függvényeit vizsgálom. Az átmeneti függvények meghatározása során a repülőgép bemeneti jelének tekintem a magassági kormány egységugrás jellegű kitérítését, kimeneti jelnek pedig a hosszirányú nem irányított mozgás (ϑ , H , ω_z) állapotváltozóit.

A hosszirányú mozgás állapotváltozóinak repülési sebességben paraméterezett átmeneti függvényei a 8., 9., 10. ábrákon láthatók.

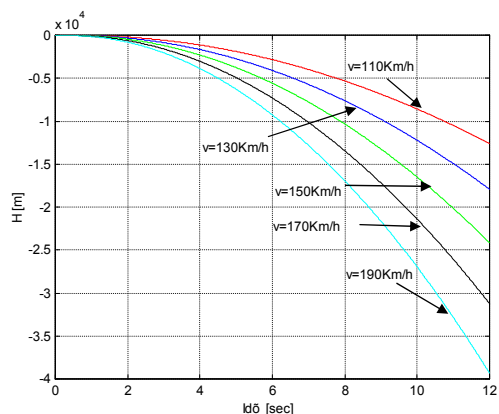


8. ábra. A bólintási szög átmeneti függvénye



9. ábra. A bólintási szögsebesség átmeneti függvénye

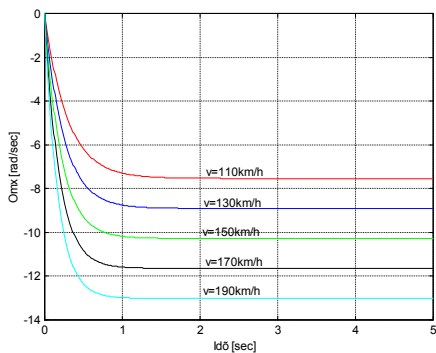
A 8. ábrán a bólintási szög értéke $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válik. A 9. ábrán a bólintási szögsebesség időfüggvénye kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén konstans értékűvé válik.



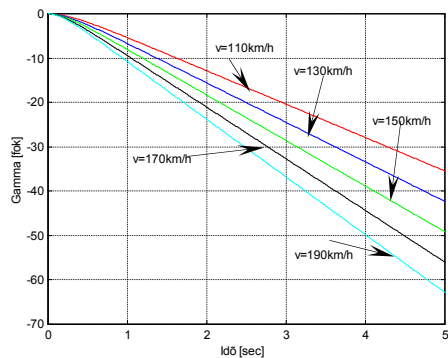
10. ábra. A magasság átmeneti függvénye

A repülési sebesség növekedésével a stacioner állapot abszolút értéke nő. A 10. ábrán látható, hogy a repülési magasság átmeneti függvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válnak.

Határozzuk meg a Szojka–III repülőgép oldalirányú nem irányított mozgásának átmeneti függvényeit. Az átmeneti függvény meghatározása során legyen a repülőgép bemeneti jele a csűrőlapok egységugrás jellegű kitérítése. A repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása állapotváltozóiinak tranziens viselkedése a 11., 12. ábrákon látható. A 11. ábrán az orsózó szögsebesség időbeli lefolyása kezdetben exponenciálisan változó jellegű, majd $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség növekedésével növekvő abszolút értéket vesz fel. A 12. ábra alapján megállapítható, hogy a bedöntési szög időfüggvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válnak.



11. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye



12. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvénye

A repülőgép nemirányított mozgásának irányítástechnikai minőségi jellemzőit. az 1. táblázat, 2. táblázat foglalja össze. Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy az oldalirányú mozgás karakterisztikus egyenletei az origóban, és a negatív tengelyen elhelyezkedő pólusokkal rendelkeznek. A csillapítási tényező értéke -1 és 1.

Az oldalirányú mozgás minőségi jellemzői

1. táblázat

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

A hosszirányú mozgás minőségi jellemzői

2. táblázat

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekven- ciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-1,57	1	$0,5 \leq \xi < 1$	1,57

2. üzemmód: $v=130$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-1,85	1	$0,5 \leq \xi < 1$	1,85
3. üzemmód: $v=150$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,14	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,14
4. üzemmód: $v=170$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,42	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,42
5. üzemmód: $v=190$ km/h, $H=400$ m, $m=135$ kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,71	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,71

A 2. táblázatban látható, hogy a repülőgép hosszirányú mozgását leíró egyenletek a vizsgált üzemmódokon az origóban és a negatív valóstengelyen elhelyezkedő pólusokkal rendelkeznek. A ξ csillapítási tényező értéke -1 és 1.

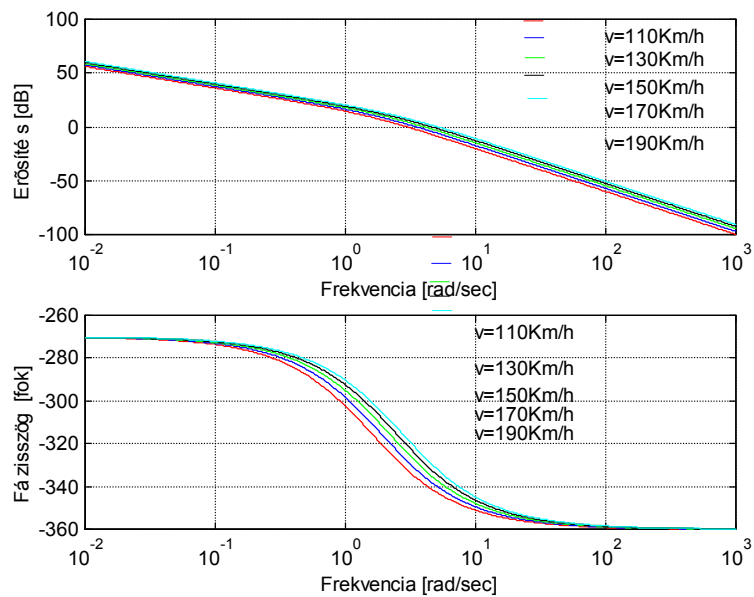
A SZOJKA–III PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP ANALÍZISE FREKVENCIATARTOMÁNYBAN

A stabilis működés feltételei — az időtartomány helyett — sok esetben előnyösebben tisztázhatók frekvenciatartományban. A komplex frekvenciafüggvények ábrázolására több módszer ismert. A frekvencia diagram legkönnyebben kezelhető formája a Bode-diagram. A számítógépes vizsgálati módszerek alkalmazásával sem csökkent a Bode-diagram szerepe: könnyen meghatározható, és szemléletes.

A repülőgépet térbeli mozgása során a frekvenciatartományban jól leírható külső és nagyfrekvenciás belső zavaró jelek gerjesztik. A fellépő külső és belső zajok re-

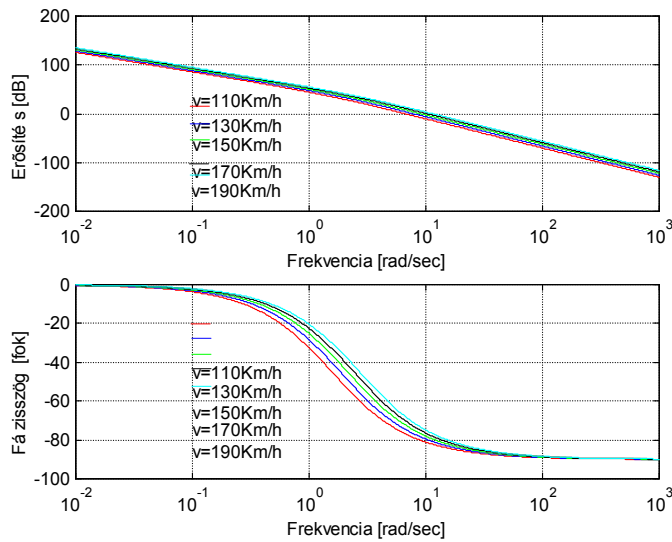
pülőgépre gyakorolt hatásának ismerete szükséges, hogy a megfelelő minőségi jellemzőket biztosító szabályozási rendszert megtervezhessük [6, 8, 18].

A 13., 14., 15. ábrákon a nemirányított repülőgép hosszirányú mozgásjellemzőinek Bode-diagramjai láthatók. A 13. ábráról leolvasható, hogy a bólintási szög Bode-diagramja a repülési sebesség növekedésével kismértékben nő. Az erősítés — a frekvencia növekedésével — monoton csökkenő jellegű. A 13. ábrán jól látható, hogy az $f \cong 1,567 \frac{1}{\text{sec}}$ törésponti frekvencián az erősítés körfrekvencia jelleggörbe meredeksége -20 dB/D -al növekszik, és a vágási körfrekvencián a meredeksége nagyobb, mint -40 dB/D .



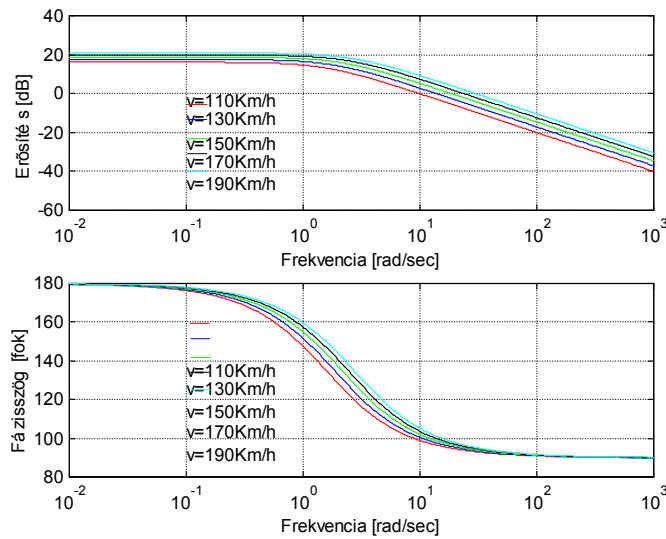
13. ábra. A bólintási szög Bode-diagramja

A stabilitás eldöntéséhez meghatároztam a nemirányított repülőgép erősítési-, és fázisstartalékát, amelyekre zérus értékeket kaptam. A Bode-stabilitási kritérium felhasználásával megállapítottam, hogy a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép a „bólintási szög – magassági kormány” csatorna tekintetében instabil viselkedésű. A 14. ábrán látható, hogy a magasságváltozás amplitúdó karakterisztikája a frekvencia növekedésével, a vizsgált tartományon monoton csökkenő. A repülési sebesség növekedésével az erősítés értéke kismértékben nő.



14. ábra. A repülési magasság Bode-diagramja

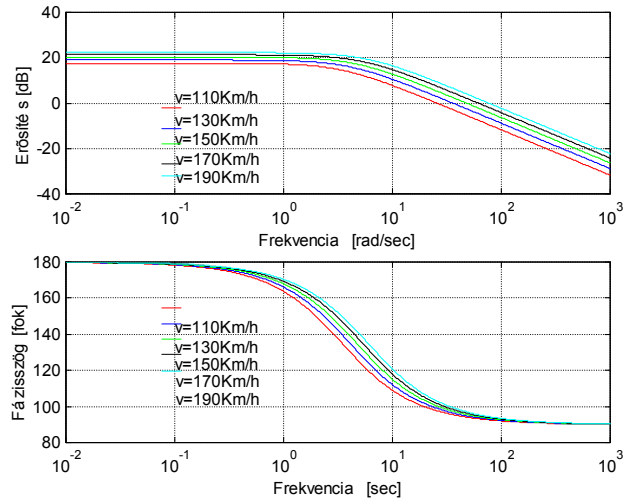
A 15. ábrán a bólintási szögsebesség Bode-diagramja látható. Az erősítés a kis frekvenciás tartományon konstans, a törésponti frekvenciától nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő jellegű. Az erősítés- és a fáziskarakterisztika egytároló jellegű.



15. ábra. A bólintási szögsebesség Bode-diagramja

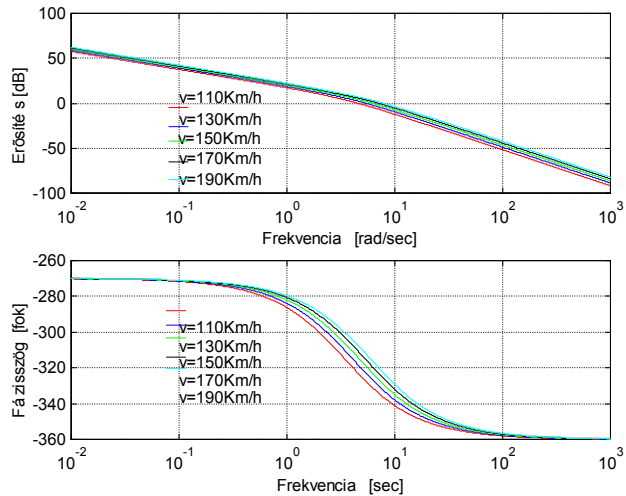
A 16. és a 17. ábrákon az oldalirányú mozgás állapotváltozóinak Bode-diagramjait látjuk. A 16. ábra alapján könnyen belátható, hogy az amplitúdó karakterisztika kis- és közepes frekvencia tartományon frekvencia független. A törésponti frekvenciától

nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő értékeket vesz fel. A repülési sebesség növekedésével az erősítés abszolút értéke nő. Az erősítés-, és fáziskarakterisztika a bolyintási szög karakterisztikáihoz hasonlóan egytároló jelleget mutat.



16. ábra. Az orsózó szögsebesség Bode-diagramja

A 17. ábrán a bedöntési szög amplitúdó- és fázis karakterisztikái láthatók. A karakterisztikák kisfrekvenciás tartományban a repülési sebességtől függetlenül gyakorlatilag együtt futnak. A térbeli mozgás állapotváltozóinak minőségi jellemzői lényegében nem függenek a repülési sebességtől.



17. ábra. A bedöntési szög Bode-diagramja

Az amplitúdó-, és a fázistartalék az összes vizsgált repülési üzemmódon nulla [3, 9, 10, 14, 15].

KÖVETKEZTETÉSEK

A szerző elvégezte a Szojka–III repülőgép hosszirányú és oldalirányú mozgásának számítógépes analízisét. A Szojka–III pilótanélküli repülőgép nemirányított oldal-, és hosszirányú mozgásának 1. és 2. táblázatokban felsorolt irányítástechnikai minőségi jellemzőinek és a [11, 12, 13] irodalmakban előírt irányítástechnikai minőségi követelmények az összevetéséből a következő megállapításokra juthatunk.

— Időtartománybeli vizsgálatok esetén:

- a Szojka–III repülőgép hosszirányú mozgásának két állapotváltozója negatív csillapítási tényezővel rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a nemirányított repülőgép instabil;
- a repülőgép nemirányított hosszirányú mozgásának harmadik ω_z összetevőjének (állapotváltozójának) csillapítási tényezője 1, amely nagyobb, mint az előírt;
- a repülőgép nemirányított oldalirányú mozgásának egyik összetevője (dőlési szög) negatív csillapítási tényezővel rendelkezik, vagyis a repülőgép instabil;

Frekvenciatartománybeli vizsgálatok esetén:

- a repülési sebesség növekedésével az erősítés, és a fázisszög értéke — állandó frekvencián — növekszik;
- a frekvencia növekedésével — állandó sebesség mellett — az erősítés, és a fázisszög értéke csökken;
- a Szojka–III repülőgép hosszirányú nemirányított mozgása instabil;
- a Szojka–III repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása instabil;

Az összes vizsgált repülési üzemmódra (az oldal-, és a hosszirányú mozgásra) az erősítési-, és a fázisstartalékok kivétel nélkül zérusértékűek, amelyek nyilvánvalóan nem felelnek meg az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek.

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép nemirányított hosszirányú-, és oldalirányú mozgása instabil. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép kézi távvezérelt kormányzása, valamint az automatizált irányítása egyaránt megköveteli a stabilis működést. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép stabilitási problémáinak megoldására, valamint az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények biztosítására pólus áthelyezést megvalósító, teljes állapot-visszacsatolású zárt szabályozási rendszer megtervezését javaslom.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Csáki F.: Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- [2] Tuschák R.: Szabályozástechnika 1. füzet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1993.
- [3] Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB® (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.

- [4] Amaczi, V. Többcélú, kisméretű, pilóta nélküli repülőgép-komplexum
<http://www.haditechnika.hu/Archivum/199201/920110.htm>
- [5] SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.
- [6] Szabolcsi R.— Szegedi P.: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki tudományos konferencia MTESZ, Szolnok 2002. nov. 06. (CD-ROM).
- [7] Pilóta nélküli felderítő repülő eszközök. Haditechnikai Intézet, Haditechnika füzetek 1.sz 1999.
- [8] Somló, J. – Pham Thuong Cat Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
- [9] Szabolcsi R.: Szabályozástechnikai feladatok megoldása a MATLAB® alkalmazásával, Egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
- [10] Biran. A. – Breiner, M. MATLAB® for Engineers, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
- [11] MIL–C–18244A (AS) Control and stabilization system: automatic, piloted aircraft general specification for, 1992.
- [12] MIL–F–8785C Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [13] MIL–F–9490D Flight Control Systems – Design, Installation and test of piloted aircraft general specification for, 1993.
- [14] Chiang, R. Y. – Safonov, M. G. MATLAB® Robust Control Toolbox, User's Guide (version 2), The MathWorks, Inc., 1996.
- [15] Szabolcsi R. – Szegedi P. Pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének előzetes méretezése, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Tudományos konferencia, Repüléstudományi Közlemények Elektronikus különszáma (CD mellékleten), Szolnok, 2005 04. 15.
- [16] Tuschák, R. Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
- [17] Bokor, J. – Kurutz, K. – Kohut, M. – Gáspár, P. Irányítástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1995.
- [18] Helm, L. – Marton, J. A szabályozástechnika elméleti alapjai (lineáris rendszerek) II. rész, kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1965.