

**„KUTATÓ-MENTŐ LÉGI ROBOTOK ALKALMAZÁSI
SAJÁTOSSÁGAI, AUTOMATIKUS
REPÜLÉSSZABÁLYOZÁSA, ÉS EXTREMÁLIS/OPTIMÁLIS
REPÜLÉSI PÁLYÁJÁNAK TERVEZÉSE”**

TANULMÁNY

**ÖSSZEÁLLÍTOTTA:
PROF. DR. SZABOLCSI RÓBERT
OKL. MK. EZREDES, EGYETEMI TANÁR**

Készült:
a TÁMOP 4.2.2 „Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban” pályázat
169-4/2012/NKE nyilvántartási számú szerződés mellékletét képező
szakmai specifikáció alapján.

Budapest, 2012. augusztus 6.

/ Prof. Dr. Szabolcsi Róbert okl. mk. ezredes /
egyetemi tanár

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	3 oldal
I. fejezet: UAV alkalmazások, alkalmazói elvárások meghatározása	25 oldal
II. fejezet: UAV automatikus repülésszabályozása, szabályozótervezés	112 oldal
III. fejezet: Külső környezet matematikai modellezése, fedélzeti szenzorajok modellezése)	158 oldal
IV. fejezet: UAV irányítástechnikai vizsgálata	190 oldal
V. fejezet: UAV extrémális (optimális) repülési pályák tervezése, és azok matematikai modellezése	217 oldal



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

BEVEZETÉS

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

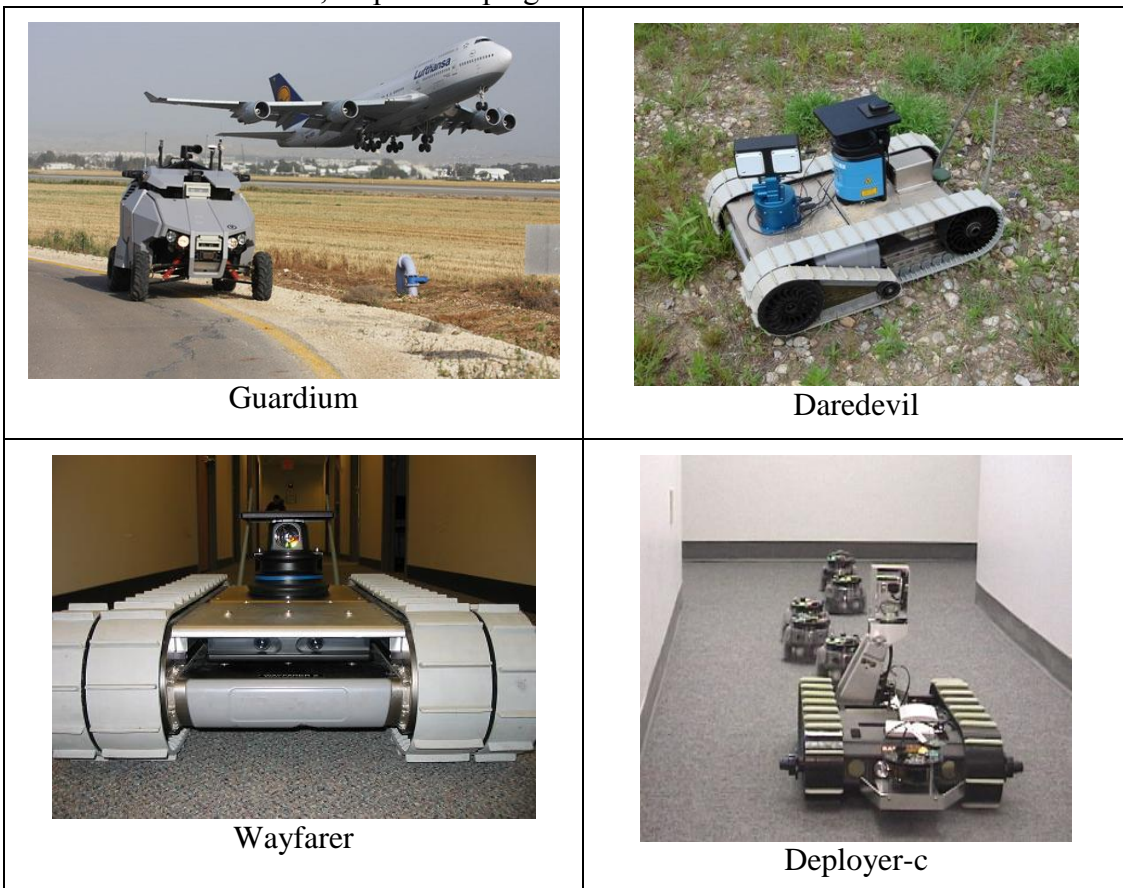
I. SZÁRAZFÖLDI ROBOTOK ÉS AZOK ALKALMAZÁSA

A felszíni robotok széles körben használt eszközök, amelyek úgy katonai-, mind a nem katonai alkalmazások során számos előnyös tulajdonságukat mutatják meg. A polgári alkalmazások során sokszor szükséges nehezen megközelíthető helyekre bejutni (pl. földrengések után kutatás a romok alatt), vagy katasztrófák esetén, veszélyes helyeken is bevethetőek, mivel emberi kezelőszemélyzet nincs a fedélzeten.

Ma már elképzelhetetlen az, hogy a csernobili atomerőmű katasztrófához hasonlóan, emberi erővel végezzék egy nukleáris katasztrófa helyének felderítését (l. Fukusimai Atomerőmű).

Az 1. ábrán látható néhány szárazföldi robot, amelyek közül a:

1. Guardium repülőterek biztonságtechnikai problémáinak megoldását támogatja;
2. a Daredevil, a Wayfarer és a Deployer felderítő-adatgyűjtő feladatok megoldására kiválóan alkalmasak, alapvetően polgári célú alkalmazások esetén.



1. ábra

Bár technológiák szintjén sokszor nincs különbség a robotok katonai és polgári alkalmazásai között, mégis, szokás a katonai robotok alkalmazásáról elkülönítetten beszélni. A 2. ábrán egy kisméretű, felderítő robotot látunk.



2. ábra. Packbot.

A 3. ábrán szintén egy felderítő robot, és az azt kezelő katona látható.



3. ábra. Marcbot

A 4. ábrán egy felderítő robot látható, amit felszereltek egy megfogóval is, ami lehetővé teszi a hadszíntéren a veszélyesnek minősített tárgyak (lőszer, gránát, akna stb.), és eszközök megközelítését, annak megfogását, és adott távolságra történő elszállítását is.



4. ábra. Talon F.O.S.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

Az 5. ábrán aknakutató/mentesítő "robotot" látunk. Nem szorul különösebb magyarázatra, hogy ez a technikai/technológiai megoldás „emberbarát”, és nem teszi ki a kezelő személyzetet felesleges kockázatnak.



5. ábra. M160

És végezetül, a 6. ábrán egy fokozott túlélő képességű, fokozott járóképességű felszíni kutatórobot látható.



6. ábra. XM1216

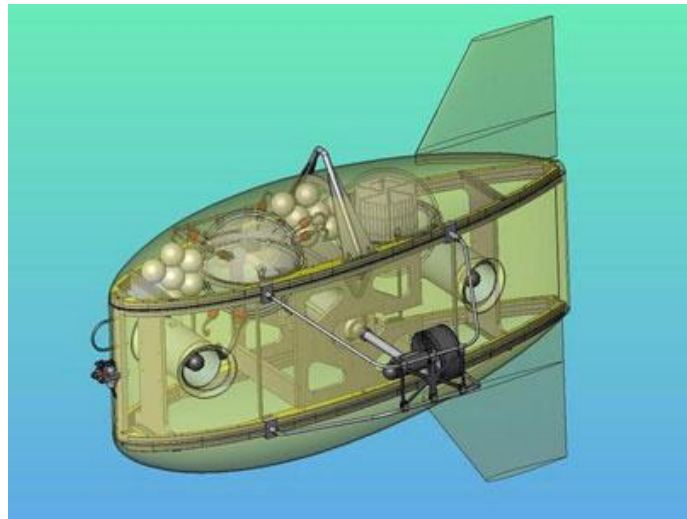
II. VÍZALATTI ROBOTOK ÉS AZOK ALKALMAZÁSA

2.1 BEVEZETÉS

A Föld felszínének mintegy 71 százalékát víz borítja. A vízfelszín alatti világ számos része mind a mai napig felfedezetlen. A vízi világ flórájának, és faunájának vizsgálata így kiemelt fontosságú a modern korban. A tenger-, és óceánkutatás ma már nemcsak tudományos, hanem gazdasági-, pl. turisztikai jelentőséggel is bír.

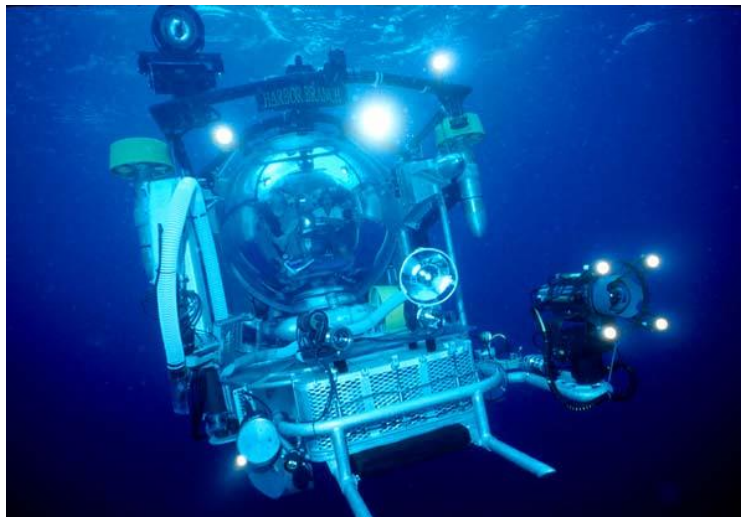
A tengerfenék kutatása fontos a nyersanyagok hozzáférhetőségének javítása területén (olajmezők kutatása), valamint az IT-technológiák kiterjesztése területén is. A hagyományos adatátvitel, várhatóan még hosszú ideig megőrzi kiemelt fontosságát ezen a területen.

A vízfelszín alatti távvezérelt robotok tervezésével, és fejlesztésével számos egyetem, és kutatóintézet foglalkozik, mint például az MIT. Az 1990-es évek elején elkezdett kutatási programjuk célja olyan vízfelszín alatti kutatórobot kifejlesztése volt, ami képes 6000 m mélységig merülni, ezzel a tengerfenéken elhelyezkedő olajkutatok fejeihez hozzáfért, azokon kisebb javításokat képes volt elvégezni, és kisebb méretű/tömegű tárgyakat képes volt a felszínre hozni. A kifejlesztett kutatórobot az Odyssey IV nevet kapta, és a 7. ábrán átható.



7. ábra. Odyssey IV. [Forrás: 4].

Az ember vezette vízfelszín alatti (mini)tengeralattjárók néhány típusa, a teljességre nem törekedve: Alvin, Clelia, DeepWorker, Johnson Sea-Link (8. ábra), Mir I, Mir II, Pisces IV, Pisces V [4].



8. ábra. Johnson Sea-Link [Forrás: 4].

A 9. ábrán jól láthatóak a propulziós rendszer elemei, a navigációhoz szükséges fénytechnikai eszközök, a robotkarok, manipulátorok.



9. ábra. Felszín alatti kutatórobotok [Forrás: 4].

A mélytengeri kutatások egyik történelmi eseménye volt a Mariana-árok kutatása. A felszín alatti kutatórobot fedélzetén James Cameron foglalt helyet. A 10898 m-es merülés célja a filmzés mellett robotkarokkal végrehajtott minta-gyűjtés is volt, ami technikai problémák miatt ugyan megghiúsult, de összességében a kutató expedíció elérte a célját. A közel hét méter hosszú, és 12 tonnás Deepsea Challenger tengeralattjárót speciálisan erre az expedícióra fejlesztették ki [5].



10. ábra. A Deepsea Challenger [Forrás: 5].

Megállapíthatjuk tehát, hogy a robotika szinte minden ága rohamléptekben fejlődik, és újabbnál újabb olyan alkalmazásokkal bővül úgy a katonai-, mind polgári alkalmazások területén.

2.2 VÍZFELSZÍN ALATTI FELDERÍTŐ ESZKÖZÖK, AZOK ALKALMAZÁSA ÉS SZABÁLYOZÁSTECHNIKÁJA

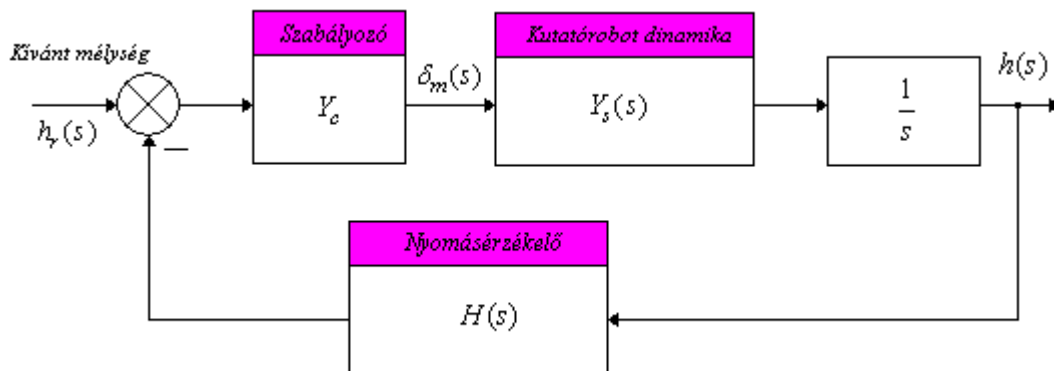
A ma használatos vízfelszín alatti kutatórobotok (tengeralattjárók) számát szinte megbecsülni sem lehet. Alkalmazási területük szinte minden képzeletet felülmúl:

1. tengerfenék kutatás, és térképezés;
2. tengerfenék vulkanikus folyamatok megfigyelése;
3. elsüllyedt hajóroncsok kutatása;
4. kutatás ásványkincsek után;
5. a globális felmelegedés folyamatainak megfigyelése;
6. mélytengeri élővilág kutatása;
7. kincsvadászat;
8. szórakoztató ipar ...

A vízfelszín alatti kutatórobotok lehetnek

1. autonóm viselkedésűek, amikor vezeték nélküli kapcsolat segítségével irányítják a kutatórobotot;
2. nemautonóm kialakításúak, amikor vezetéken jut el a vezérlőjel a fedélzetre.

Egy vízfelszín alatti autonóm kutató robot merülési mélységét szabályozó rendszer hatásvázlata a 11. ábrán látható.



11. ábra. Vízfelszín alatti autonóm kutató robot mélység szabályozása [7 után: Szabolcsi].

A 11. ábrán:

$Y_c(s) = 1$: soros szabályozó,

(2.1)

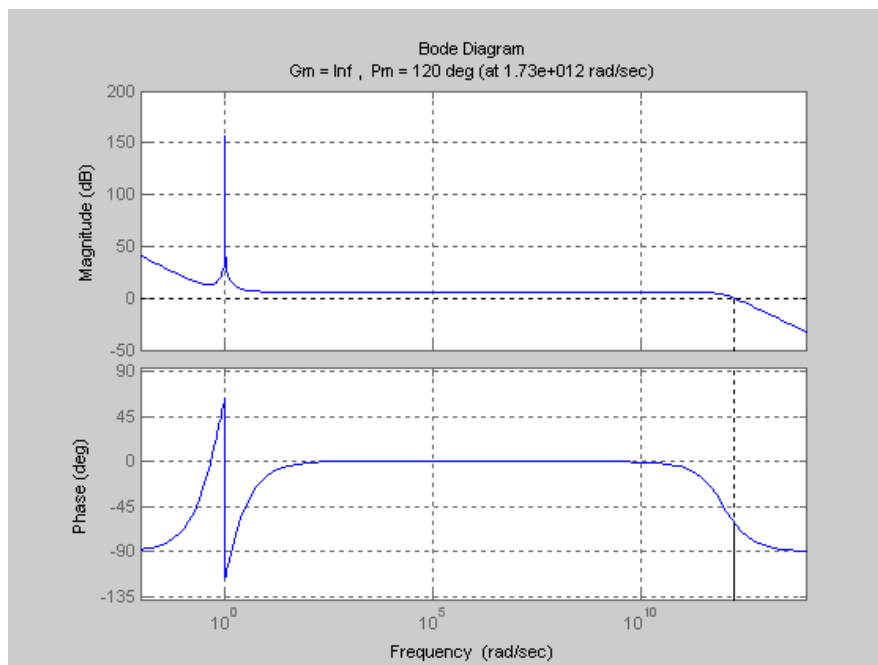
$$G(s) = \frac{(s+1)^2}{s^2+1} : \text{vízfelszín alatti kutatórobot dinamikája a függőleges tengely mentén}, \quad (2.2)$$

$$H(s) = 2s+1 : \text{víznyomásmérő dinamikája}. \quad (2.3)$$

Határozzuk meg

1. a felnyitott szabályozási rendszer Bode-diagramját, és a minőségi jellemzőket;
2. a súlyfüggvényt;
3. az átmeneti függvényt.

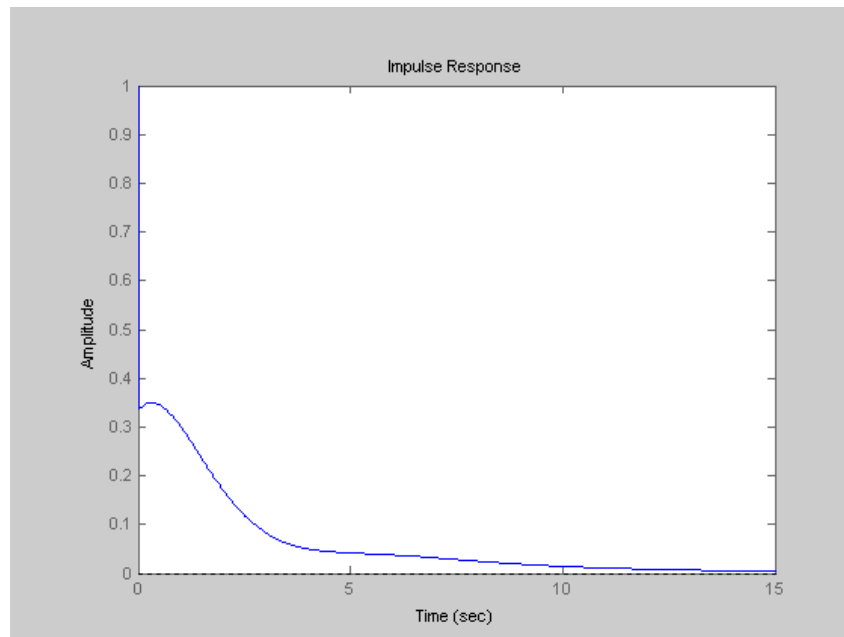
Ábrázoljuk e függvényeket, és elemezzük őket. Bontsuk fel a 11. ábrán látható zárt szabályozási rendszert az ellenőrző jel ágában, és határozzuk meg a felnyitott rendszer Bode-diagramját, és a minőségi jellemzőket. A Bode-diagram a 12. ábrán látható.



12. ábra. Kísérleti vízfelszín alatti kutatórobot Bode-diagramja.

A 12. ábrán jól látható, hogy a rendszer '1'-típusú. A felnyitott szabályozási rendszer Bode-diagramja egy robusztus rendszer frekvencia-függvénye: kisfrekvenciás tartományban nagy erősítéssel viszi át jeleket. Közepes frekvenciatartományban ($1 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 100 \text{ rad/s}$) szintén erősítve viszi át a bemeneti jeleket. A vágási körfrekvencián az erősítés-körfrekvencia jelleggörbe -20 dB/dek meredekséggel metszi a vízszintes tengelyt. Nagyfrekvenciás tartományban nagy meredekséggel törli le a erősítés-körfrekvencia jelleggörbe, vagyis a zárt szabályozás jó zavarvédelemmel rendelkezik, mert az érzékelő nagyfrekvenciás zajait szűrve viszi át a rendszer, nagyon kis erősítéssel.

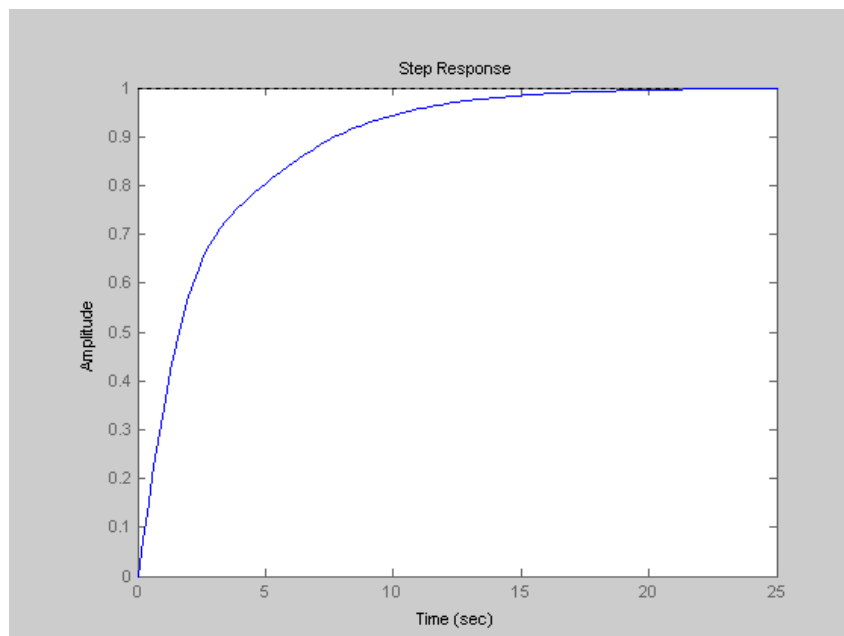
A zárt szabályozási rendszer időtartománybeli viselkedését a 13., és a 14. ábrán vizsgálhatjuk.



13. ábra. Kísérleti vízfelszín alatti kutatórobot súlyfüggvénye.

A 13. ábra alapján könnyen belátható, hogy a zárt szabályozási rendszer stabilis, mert a $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) \rightarrow 0$. A tranzienst folyamat kissé lengő jellegű.

A 14. ábrán a zárt szabályozási rendszer átmeneti függvénye látható.



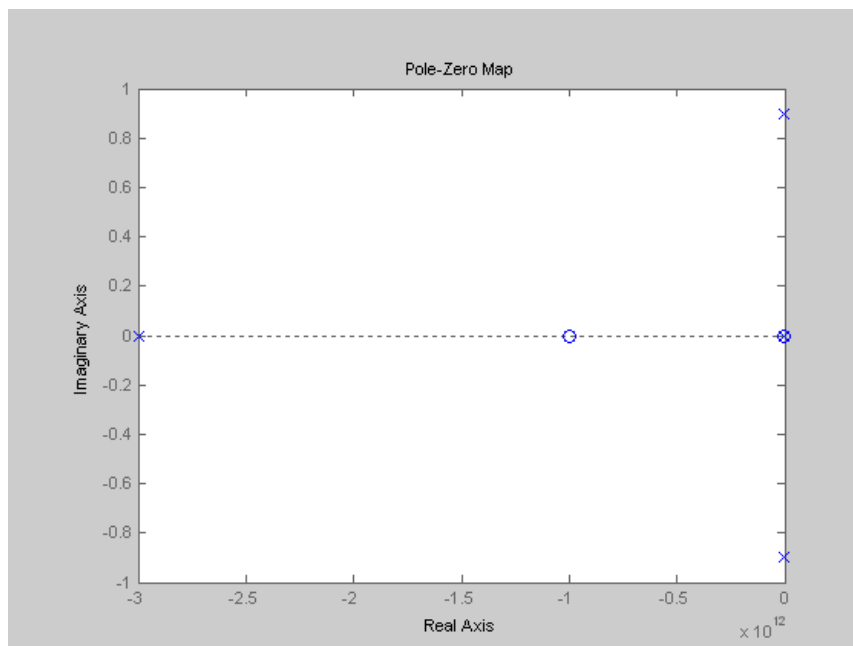
14. ábra. Kísérleti vízfelszín alatti kutatórobot átmeneti függvénye.

A 14. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a zárt mélységszabályozó rendszer az egységugrás bementi jelet leköveti. A merülési mélység $h=1\text{ m}$ -rel történő megváltoztatásához $\Delta=5\%$ esetén $t\cong 12,5\text{ s}$ idő szükséges, ami lassú dinamikáról árulkodik. Ha gyorsítani szükséges a transziens folyamatot, akkor az a jelenleg is alkalmazott $Y_c(s)$ soros, arányos (P) szabályozó helyett célszerű PD-szabályozót alkalmazni. A P-szabályozóval működő zárt mélységszabályozó rendszer minőségi jellemzőit az 1. Táblázat foglalja össze.

A zár szabályozási rendszer minőségi jellemzői 1. Táblázat

Sajátértékek	Csillapítási tényező	Körfrekvencia, ω , [rad/s]
$p_1 = -0,255$	1	0,255
$p_{2,3} = -0,706 \pm 0,899 i$	0,617	1,14
$p_4 = -3 \cdot 10^{12}$	1	$3 \cdot 10^{12}$

A zárt szabályozási rendszer pólusait, és zérusait a 15. ábra mutatja be.



15. ábra. Kísérleti vízfelszín alatti kutatórobot pólusai és zérusai.

Az 1. Táblázat, és a 15. ábra alapján könnyen belátható, hogy a kísérleti vízfelszín alatti kutatórobot mélységszabályozó rendszerének dinamikáját a transziens folyamatok kezdetén a $p_1 = -0,255$ valós gyök, majd a $p_{2,3} = -0,706 \pm 0,899 i$ komplex konjugált gyökpár, mint domináns póluspár határozza meg.

2.3 TENGERALATTJÁRÓ DINAMIKUS VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA (USS ALBACORE - HULL)

A tengeralattjárók széles körben használatosak nemcsak katonai, de polgári célokra is. Az egyik alapvető megoldandó feladat a tengeralattjáró mélységének szabályozása, mert a merülési mélysége korlátozott: a tengeralattjáró vázszerkezete korlátozott mértékben képes ellenállni a víznyomásnak, vagyis, biztonsági okok miatt a merülési mélységet – általában – korlátozni szükséges.

1952-ben megépült a U.S.S Albacore (Hull) tengeralattjáró, amely a 16. ábrán látható.

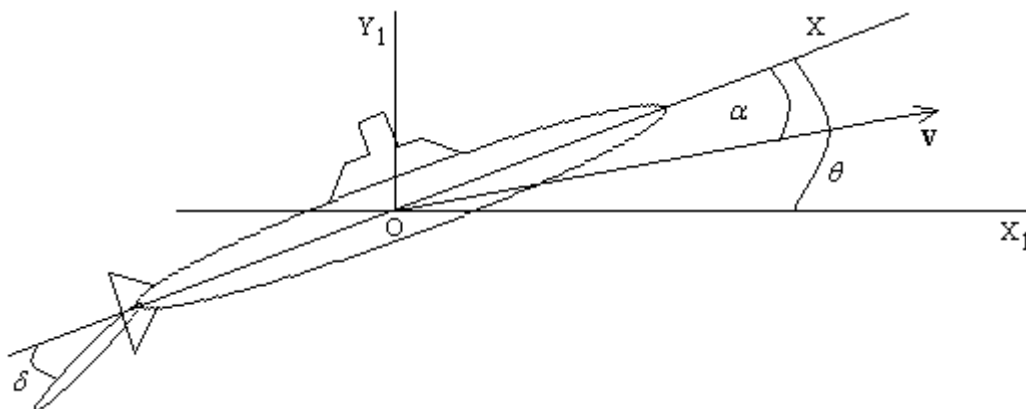


16. ábra. U.S.S Albacore 569

(Portsmouth, New Hampshire-i Albacore Múzeum. Forrás: www.heiszwolf.com)

A tengeralattjáró az alakját a Zeppelin-léghajók után választották ki, de már az 50-es években szélcsatornás kísérletekkel segítették a tervezést. Újszerű a pillangó elrendezésű vezérsík, és az éles fordulóknál használt oldalkormány. A tengeralattjárót két koaxiális elrendezésű hajócsavar hajtotta (16. ábra).

A 17. ábrán a USS Albacore 569 tengeralattjáró látható emelkedő merülési pályán [7].



17. ábra. A tengeralattjáró mélység szabályozása – kinematikai vázlat [7 után: Szabolcsi].

Az USS Albacore tengeralattjáró módosított állapot-egyenlete – az állapotváltozók kis szögeire, és $v=25 \text{ ft/s}$ sebességre – a következő alakban írható fel [7, 8, 9, 10]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0,0071 & -0,111 & 0,12 \\ 0 & 0,07 & -0,3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,095 \\ 0,072 \end{bmatrix} \delta(t), \quad (2.4)$$

ahol az állapotvektor rendezői rendre az alábbiak: θ a pályaszög; $\dot{\theta}$ a pályaszög sebessége; α az állásszög; δ a merülési kormány állásszöge.

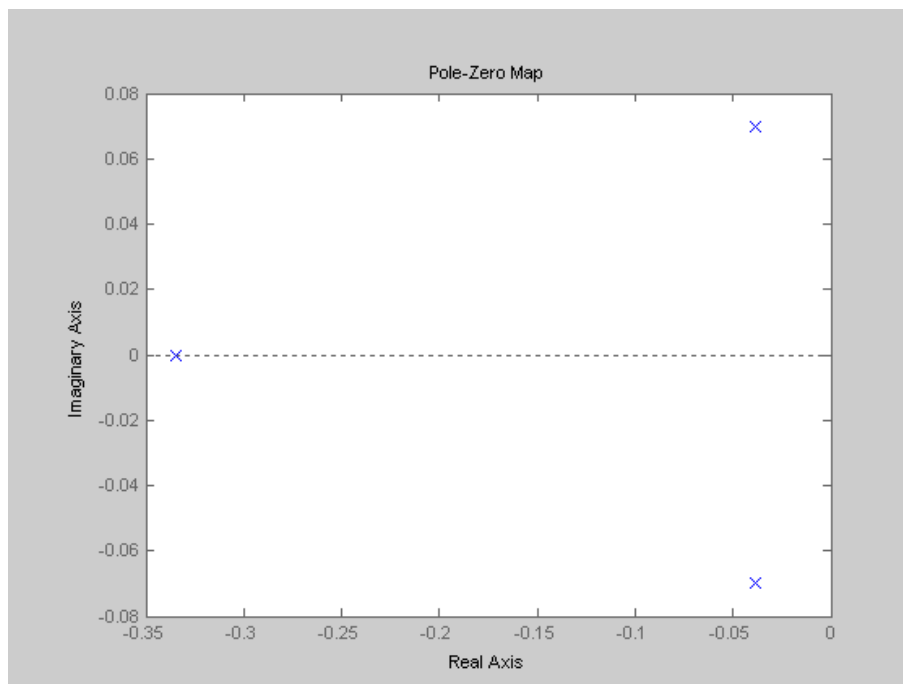
Végezzük el az Albacore tengeralattjáró stabilitásvizsgálatát, és határozzuk meg az idő-, és a frekvenciatartománybeli viselkedés fontosabb jellemzőit! A nemirányított vízijármű minőségi jellemzőit a 2. Táblázatban foglaltuk össze.

A USS Albacore minőségi jellemzői

2. Táblázat

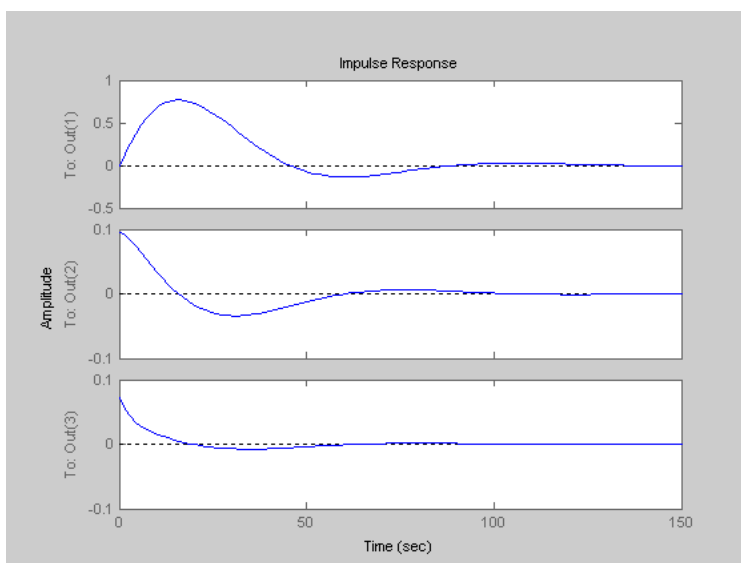
Sajátértékek	Csillapítási tényező	Körfrekvencia, ω , [rad/s]
$p_{1,2} = -0,0383 \pm 0,07 i$	0,48	0,0798
$p_3 = -0,334$	1	0,334

A 2. Táblázatban megadott sajátértékei, és zérusai a 18. ábrán láthatóak.



18. ábra. Albacore Hull pólusok és zérusok.

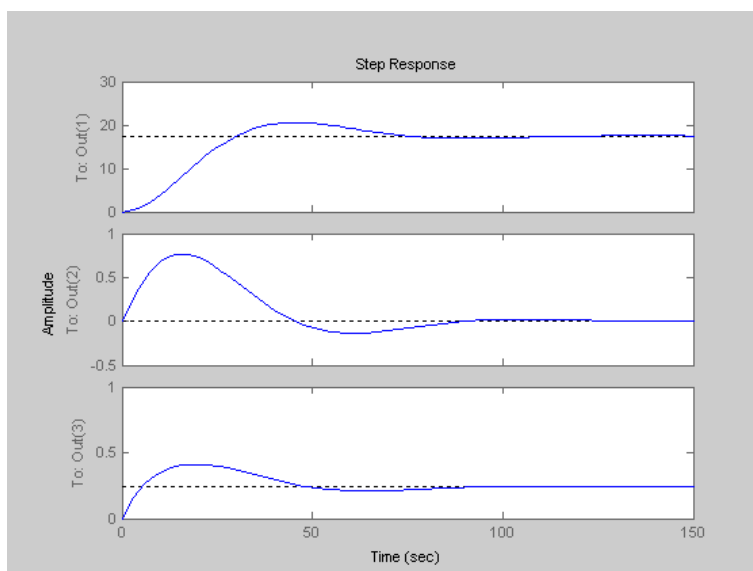
Az Albacore válasza az egységimpulzus bemeneti jelre a 19. ábrán látható.



19. ábra. A USS Albacore súlyfüggvényei.

A 19. ábra felső részén a $\theta(t)$ pályaszög súlyfüggvénye, az ábra közepén a $\dot{\theta}(t)$ pályaszögsebesség, míg az alsó részén az $\alpha(t)$ állásszög súlyfüggvénye látható. A 19. ábra alapján megállapítható, hogy a nemirányított (erőhatásmentes) tengeralattjáró stabilis működésű.

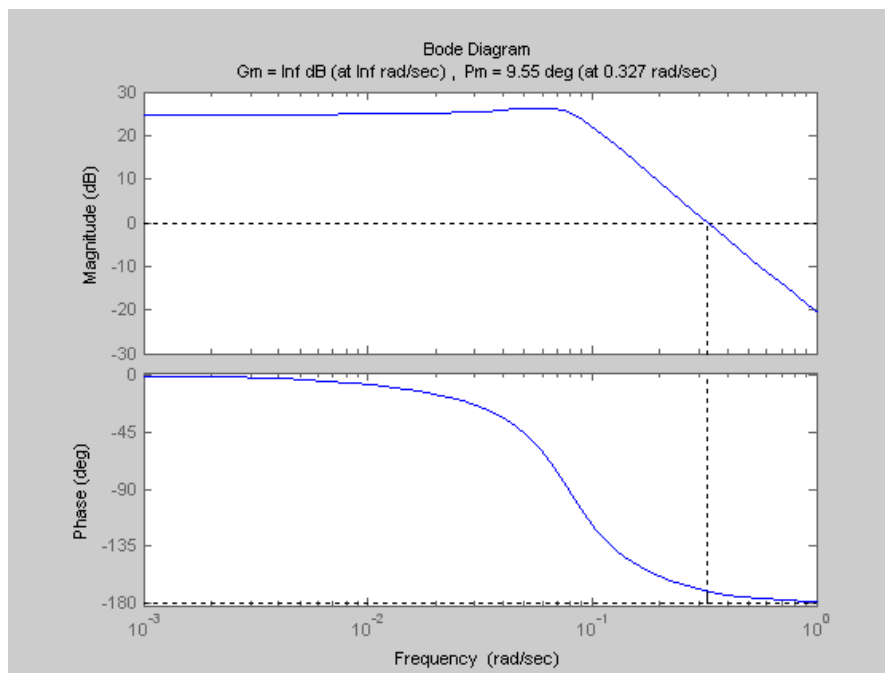
A USS Albacore válasza a merülési kormány egységugrás függvény jellegű kitérésére a 20. ábrán látható.



20. ábra. A USS Albacore átmeneti függvényei.

A 20. ábra felső részén látható a $\theta(t) \rightarrow \delta(t)$ rendszer átmeneti függvénye. Könnyen belátható, hogy a merülési kormánylapátok egység kitérésére a tengeralattjáró lengő jelleggel válaszol. A kormánylap egy fokra történő kitérése is meglehetősen nagy mértékben változtatja meg a pályaszög értékét. Más szóval, a tengeralattjáró nagyon érzékeny a kormánylapok helyzetére, és a gyakorlatban kis értékű kormánykitérésekkel is jól irányítható.

A USS Albacore tengeralattjáró $Y(s) = \frac{\theta(s)}{\delta(s)}$ átviteli függvénye alapján számított Bode-diagram a 21. ábrán látható.



21. ábra. A USS Bode-diagramja.

A 21. ábra alapján megállapítható, hogy:

1. a kisméretű jeleket nagy erősítéssel viszi át a dinamikus rendszer;
2. a nagyfrekvenciás jeleket jól szűri, vagyis erősen csillapítva viszi át a dinamikus rendszer;
3. az erősítési tartalék tart végtelenhez;
4. a fázistartalék $9,55^\circ$;
5. a dinamikus rendszer robusztus.

A tengeralattjáróval kapcsolatos további érdekes információk a [7, 8, 9, 10] forrásokban fellelhetők.

III. LÉGI ROBOTOK ÉS AZOK ALKALMAZÁSA

3.1. BEVEZETÉS, PROBLÉMAFELVETÉS, MOTIVÁCIÓ, AKTUALITÁS

Divatos, és egyben hálás téma ma pilóta nélküli repülőgépekkel foglalkozni. A műszaki tudományoknak szinte nincs is olyan szegmense, amely ne foglalkozott volna már ilyen, vagy olyan mértékben a pilóta nélküli repülőgépek valamilyen problémakörével.

Alkottunk már koncepciókat, terveztünk már földi üzemeltető rendszereket, tettünk már javaslatot, nem is akármennyit, de tengernyi, hogy milyen típusú szabályozó irányítsa a mini repülőgépet. Vizsgáltuk, hogy milyen algoritmus alapján hajtsa végre a leszállóhely megközelítését, ha erős turbulencián keresztül történik mindez, de a végeredmény – véleményem szerint – lesújtó...

A pilóta nélküli repülőgépek a világ sok országában valóban széles körben nyernek alkalmazást, míg Magyarországon szinte ismeretlen ennek az eszköznek a modern értelemben vett alkalmazása. Felmerül a kérdés: *mi ennek az oka?*!

Talán az információ hiánya?! Tekintettel a modern világ által biztosított információ-áradatra, ez nem valószínű. Talán a kutatók elefántcsont-tornya és az alkalmazók rideg világa közötti *távolság*?!

Ez sem lehet igazán ok, hiszen a hazai kutatói-, és alkalmazói kör meglehetősen korlátos: időben szinte belátható távon a piac szereplői egymással találkoznak. Természetesen, ez a hipotetikus és elméleti kérdéssor tovább folytatható, de úgy vélem, hogy ezen okok keresése egy következő kutatás tárgya lehet. Mi azonban álljuk meg egy pillanatra ezen a ponton!

Felmerül a kérdés, hogy egy eredményes alkalmazott kutatás *termékei* hogyan hasznosulnak később?! Szélsőséges esetben, egyáltalán, hasznosulnak-e?! Végül is, oda érkezünk, hogy fel kell tenni a megkerülhetetlen kérdést: a piaci szereplők egymásra találnak-e az információs bábeli zűrzavarban?! Véleményem szerint ez nem mindig történik meg!

Egyáltalán nem biztos, hogy a piacon a *kutató/tervező/gyártó/fejlesztő*-i szereplők, valamint a *vásárló/megrendelő/felhasználó*-i szereplők találkoznak egymással. A piacon a szereplők úgy viselkednek, mint ahogyan a piac – a saját öntörvényű folyamatai szerint – működik. Véleményem szerint nem lehet eltekinteni attól, hogy az egyes szereplőket elhelyezzük a piacon, és azt mondjuk: kínálati oldalon adott egy termék, vagy szolgáltatás, amit a tervező-fejlesztő oldal – vélelmezett vagy valós keresletet kielégítve – próbál értékesíteni a vevők felé. Ha a vevők ezt a kínálatot, annak kondícióival együtt elfogadják, akkor akár létre is jöhet az *üzlet*, és mindenki megleléssel állhat fel az asztaltól.

Egy másik fontos, és talán a legfontosabb szempont, amit a korábban feltett kérdésre adandó válasz keresésekor vizsgálnunk kell: ha a piaci szereplők egymásra is találnak, a piaci keresletet ébresztő oldal elfogadja-e a kor minden vívmányát felsorakoztató UAV eszközöket, vagy sem?! Elfogadja-e a vásárló/alkalmazó a tervezők maximalizáló, minden területen *high-tech*¹-et felvonultató tervezési filozófiáját, vagy az UAV-vásárlás előtt más szempontok alapján dönt?!

Ugyanezen történet másik olvasata: elfogadja-e a tervező/fejlesztő, hogy a vásárló/alkalmazó nem feltétlenül keresi a piacon az általa kínált terméket, mert annak – esetleg – túlságosan magas, vagy magasnak vélt a beszerzési-, illetve az üzemeltetési költsége?!

¹ high technology – magas szintű technológia

Másképpen fogalmazva: a tervező/fejlesztő maximalizáló, és a vásárló/alkalmazó minimáló törekvései lehetővé teszik-e, hogy a piacon az adott termék/szolgáltatás kelendő legyen?!

Felmerül a következő kérdés is: az alkalmazott kutatások során mennyire érvényesülnek a szakmai előírások és követelmények, és milyen súllyal veszik figyelembe a piacon a *vásárlói* szempontokat?! Nyilvánvaló, korábban, amíg a fejlesztési források jóval nagyobb mértékben álltak rendelkezésre, ez a kérdés nem nyomott igazán a latban. A közeli és a távolabbi jövő egyik fontos kihívása a források korlátozott volta, amit hosszú időn keresztül a piac szereplői – következmények nélkül – nem hagyhatnak figyelmen kívül. A másik, ma már szintén nagyon fontos tényező: az idő kérdése. Hogyan alakulnak ki a piacon a keresleti viszonyok, és meddig érzékelhető egy adott termék iránt a kereslet?!

A tervező/fejlesztői oldal nem tehet mást, mint kielégíti a megrendelő/vásárló/alkalmazó követelményeit – úgy, és olyan minőségben szolgáltat, hogy a vevő azt megleléssel nyugtázza. Ha ez nem így történik, normális piaci viszonyok között a piaci szereplők nem kerülnek egymással *üzleti* kapcsolatba. Sajnos, ez a jelenség – tekintettel a pilóta nélküli repülőgépek meglehetősen korlátozott hazai alkalmazására – élő, és viruló hazánkban.

A felmerülő újabb probléma: a kutató/fejlesztői oldal minek tekinti a kutató-fejlesztő munkájának eredményeit?! Szigorúan véve tudományos eredménynek, amit szakmai műhelyek minősítenek, és fogadnak el, vagy utasítanak el, esetleg közzé is tesznek valamilyen periodikumban. A másik kihívás: hajlandó-e a kutató megmérgetni a piacon a termékét, az alkotó-teremtő munkájának eredményét, esetleg halandó el is adni azt?! Az álszent, vagy félig álszent köntösből végre ki kellene bújnunk, és azt mondani: én ezt az értéket/terméket hoztam létre, erre szolgál, ilyenek a képességei, és ... ennek a terméknek ennyi és ennyi az ára! A másik fél, a *vevő* azt mondja: OK, vagy azt mondja, hogy nem OK, és vagy lesz, vagy nem lesz biznissz a dologból! Egy biztos: a folyamatosan megújuló, és gyorsuló piaccgazdasági folyamatok dinamikáját befolyásolni nem tudjuk. Marad a remény: az elsők között rohanunk előre, de az is nagy eredmény, ha nem nagyon maradunk le a globális piacon a többi nagy *játékos*tól.

A következő kérdéskör, ami foglalkoztat(hat)ja a tervezőket: milyen képességeket vár el az alkalmazó, mit szeretne kapni a pénzéért a vásárló?! A vásárló a vételár megfizetésével elismeri-e egy adott UAV esetében, hogy annak repülésszabályozó rendszerét, éveken keresztül, pl. μ -szintézis módszerrel, vagy hurokátvitel visszaállítós LQG-módszerrel tervezték?! Egyébként, a tervezői oldal is nagy kihívás előtt áll: milyen tervezési filozófiát válasszunk abban az esetben, ha az UAV erdőtüzek felderítésére, vagy hadszíntéren az ellenséges célpontok felderítésére szolgál, és a bevetésről – az esetek egy jelentős részében nem is tér haza az UAV, és sok esetben, mint egyszer használatos eszközre tekintenek rá.

Feltehetően, a vásárló nem ebben a fogalmi körben gondolkodik, sőt, meg sem érti eme fogalmakat, de nem is érdekli: számára egy olyan repülőeszköz szükséges, amely képes ellátni a feladatát, olyan képességekkel bír, amelyre az alkalmazónak szüksége van, és azokat használja is, és végül, de nem utolsó sorban: az UAV kellően olcsó legyen, hogy megérje azt alkalmazni.

A szerző eme dilemmák feloldására, a felmerült kérdések legalább részleges megválaszolására, és újszerű megvilágítására országos, reprezentatív felmérést végzett az UAV-k hazai lehetséges polgári alkalmazói körében. A fő cél azon kérdések megválaszolása volt, amit már előljáróban is felvázoltam: ne (csak) a tervező/fejlesztő felfogásában próbáljunk meg értéket előállítani, hanem – elsődleges legyen – a vásárlói/alkalmazói oldal igénye, és egy adott termékkel szemben támasztott elvárása, majd az adott eszköz üzemeltetése során maradéktalanul elégedett legyen!

A szerző által megtervezett, és lebonyolított kérdőíves felmérés alapvető célja volt azon UAV-képességek meghatározása, amelyeket az alkalmazó elvár a fejlesztőktől. Mivel az információgyűjtés alapvetően képességek, műszaki paraméterek, követelmények, elvárások, és egyéb szakmai igények összegyűjtésére és elemzésére szolgált, ezért a megkérdezett csoportok jellege – az általuk megfogalmazott műszaki-, és egyéb más igények összesítése után – már nem releváns. Ennek megfelelően, az egyes piaci szereplőket, illetve csoportokat kóddal jelöli a szerző, pl. *Alpha*-csoport, *Bravo*-csoport stb.

3.2. A FELMÉRÉS FONTOSABB JELLEMZŐI

A szerző eme kutatási módszert, a kérdőíves felmérést először alkalmazta. Tekintettel arra, hogy nem volt korábbi tapasztalat, és tudás sem hasonló tartalmú kérdőív kérdéseinek összeállítására, ezért a szerző igyekezett a kérdéseket úgy megfogalmazni, hogy azok – a lehető leginkább – közérthetőek legyenek, és a kérdések érthetlensége ne riassa el a válaszadókat – a válaszok viszont kellő mélységű információt adjanak a tervezői/fejlesztői oldal képviselőinek.

A másik dilemma: ha sikerül is olyan kérdőívet összeállítani, amit akár megértene a piaci szereplők, milyen a téma aktualitása, illetve beágyazottsága a *meginterjúvolt* szakmák körében?!

A következő megoldandó feladat az volt, hogy milyen körben történjen meg a szakemberek interjúvolása?! A szerző e kérdés megválaszolásakor úgy döntött, hogy elsődleges szempontot képviselnek: hazánk Euro-atlanti tagságából eredő kötelezettségeinek teljesítése, a rendvédelem, a környezetvédelem, a természetvédelem, a katasztrófavédelem, a tűzvédelem, a mezőgazdaság, az erdőgazdálkodás, az energiaipar, valamint a közlekedés különféle ágazatai.

3.3 A FELMÉRÉS FONTOSABB EREDMÉNYEI

3.3.1. Alapfogalmak, definíciók

A kérdőíves felmérés kiértékelése előtt elengedhetetlenül szükséges néhány fogalom definiálása, amelyek az alábbiak:

- ☞ *postázott kérdőív*: a szerző által összeállított adatbázisban szereplő partnerek részére megküldött kérdőív;
- ☞ *kézbesített kérdőív*: azon kérdőív, amelyik nem érkezett vissza – bármilyen jogcím alapján is – a szerzőhöz. A felmérés eredményeinek kiértékelése során akkor fogadható el egy csoport tevékenysége, és akkor értékelhető ki a partnerek véleménye, ha a postázott felkérések legalább 90 %-a kézbesítésre is került.
- ☞ *Nem kézbesített kérdőív*: a szerzőhöz – függetlenül a jogalaptól – visszaérkezett felkérő levelek, amelyek nem érkeztek meg a véleménynyilvánításra felkért partnerhez;
- ☞ *megválaszolt felkérés*: a véleménynyilvánításra felkért partnerek – a szerző részére – megküldött válaszlevélben nyugtázzák a kérdőív kézhezvételét. A megválaszolt felkérések száma, amelyet a kézbesített kérdőívekhez viszonyítunk, az én értelmezésemben arról hordoz információt, hogy az adott téma mennyire *beágyazott* egy szakmai csoport munkájába, gondolkodásába, értékrendjébe.

Egyáltalán, van-e információja arról, hogy az ő szakmai területén milyen nemzetközi tapasztalattal rendelkeznek az UAV alkalmazók?! A felmérés eredményei akkor kiértékelhetőek, ha a kézbesített felkérések legalább 50 %-át megválaszolják a partnerek.

☞ *kitöltött kérdőív:* a véleménynyilvánításra felkért partnerek – szerző részére – megküldött válaszküldeményei, amelyekhez kitöltött kérdőívet is mellékeltek. A későbbi adatfeldolgozás során az adott célcsoport szakmai véleménye csak és kizárólag akkor kerül összesítésre és kiértékelésre, ha a kérdőívre reagálók legalább 75 %-a ki is töltötte azt.

A véleménynyilvánításra felkért célszemélyek csoportjának összeállításakor a szerző azokat a nyílt adatforrásokat alkalmazta, amelyek mindenki számára elérhetőek, pl. az állami, és a nem állami szervezetek, intézmények, valamint a felsőoktatási oktatási-kutatási intézmények internetes oldalai. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azonban, hogy eme felmérés adatbázisának összeállítása során a szerző – bizonyos esetekben, egyfajta módon – önkényesen járt el, ugyanis számos terület esetén – a szerző a rendelkezésre álló saját anyagi erőforrásainak korlátos volta miatt – véletlenszerűen választott a véleménynyilvánításra kiszemelt célszervezetek, és célszemélyek közül.

A felmérés bizonyos értelemben és bizonyos esetekben, tekinthető reprezentatívnak is, pl. a felmérés során az összes hazai nemzeti park igazgatóságát, az összes megyei katasztrófavédelmi igazgatóságot, az összes környezetvédelmi és vízügyi igazgatóságot felkérte a szerző a kérdőív kitöltésére.

3.3.2 Az Alpha-csoport kérdőíveinek elsődleges statisztikai adatai

Az Alpha-csoport összesen 10 elemű halmaz. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait az 1. táblázat foglalja össze.

Az Alpha-csoport statisztikai adatai

1. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
10	100	10	100	0	0	7	70	6	≅ 85,71

Az 1. táblázat alapján elmondható, hogy:

- ☺ a postázott kérdőívek (10 darab) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége kiértékelhető.
- ☺ A kézbesített 10 felkérésre 7 válasz érkezett (70 %), a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető.
- ☺ A kérdőívet 6 fő töltötte ki, ami a megválaszolt felkérések 85,71 %-a.

Az Alpha-csoport tevékenységéről összességében elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes (10) hazai szervezete felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. A csoport szakemberei az UAV-k alkalmazási területeiről széleskörű ismeretekkel rendelkeznek. A csoport szakmai elméleti-gyakorlati ismereteiben a téma beágyazott, az UAVk alkalmazásáról pozitívan nyilatkoznak. A csoport aktívan vett részt a kérdőív kitöltésében.

 	<p>MAGYARORSZÁG MEGÚJUL</p> <p>A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.</p>	<p>TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)</p>
--	--	--

3.3.3 A *Bravo*-csoport kérdőíveinek elsődleges statisztikai adatai

A *Bravo*-csoport 13 elemű halmaz. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait a 2. táblázat foglalja össze.

A *Bravo*-csoport statisztikai adatai

2. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
13	100	13	100	0	0	10	≈ 76,92	11	110

A 2. táblázat alapján elmondható, hogy:

- ☉ a postázott kérdőívek (13 darab, amely 12 szervezetet, és egy jogi személyiséget takar) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége tehát kiértékelhető.
- ☉ A kézbesített 13 felkérésre 10 partnertől (9 szervezet, egy jogi személyiség, ≈ 76,92 %) érkezett válasz, a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető. Megemlíteni szükséges, hogy a válaszadásra felkért 12 szakmai szervezet közül 3 nem válaszolt a megkeresésre.
- ☉ A 11 visszaküldött és kitöltött kérdőívet 8 partner (7 szervezet, és egy jogi személyiség) töltötte ki, illetékességi okok miatt egy szervezet 4 osztálya is megküldte a kitöltött kérdőíveket. A kitöltött kérdőívek aránya megválaszolt felkérésekhez képest 110 %, vagyis a csoport adatszolgáltatási tevékenysége kiértékelhető.

A *Bravo*-csoport tevékenységéről elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes hazai szervezete (12) felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. A megkérdezett 12 szervezet közül 7 (≈ 58,33 %) válaszolt a kérdőív kitöltésével, 2 szervezet (≈ 16,66%) jelezte, hogy kompetencia hiányában nem tudja kitölteni a kérdőívet, és végezetül, 3 szervezet (25%) semmilyen módon sem reagált a megkeresésre. Ebben az értelmezésben azonban vizsgálat tárgyát képezheti, hogy miért volt ilyen alacsony a részvételi arány?!

Ebben a statisztikai értelmezésben már rosszabb paramétereket kapunk, mint a kiindulási esetben. A relatív alacsony részvételi arány – a képviselt szakmai területek, pl. vízügy, környezetvédelem – ismeretében nehezen magyarázható, hiszen hazánk az elmúlt néhány évben számos jelentős árvíznek, valamint belvíznek volt kitéve, és tekintettel a klímaváltozás várható következményeire, ez a későbbiekben sem lesz másként: vélelmezhetően még nagyobb extremitással, még szélsőséesebb módon jelentkeznek majd a környezeti hatások.

Tekintettel a partnerek relatív alacsony részvételi arányára, a *Bravo*-csoportról – általában – elmondható: az UAVk lehetséges alkalmazását nem, vagy csak részben látják szükségesnek, e szakmai körökben a téma nem, vagy csak részben *beágyazott*. A csoport tagjai e véleményüknek hangot is adtak a válaszleveleikben, illetve a témával kapcsolatban további információkat kértek az UAV lehetséges alkalmazásairól.

3.3.4 A Charlie-csoport kérdőíveinek előzetes statisztikai adatai

A Charlie-csoport összesen 11 elemű halmaz. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait a 3. táblázat foglalja össze.

A Charlie-csoport statisztikai adatai

3. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
11	100	11	100	0	0	6	≈ 54,54	5	≈ 45,45

A 3. táblázat alapján elmondható, hogy:

- ☺ a postázott kérdőívek (11 darab) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége kiértékelhető.
- ☺ A kézbesített 11 felkérésre 6 válasz érkezett (≈ 54,54 %), a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető.
- ☺ A kérdőívet 5 fő töltötte ki, ami a megválaszolt felkérések ≈ 83,33 %-a.

Az Charlie-csoport tevékenységéről összességében elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes (11) hazai szervezete felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. Mindazonáltal, elgondolkodtató, hogy a partnerek ≈ 45,45 %-a egyáltalán nem tartotta fontosnak és érdekesnek a témát arra, hogy a megkeresésre válaszoljon, és hazánk schengeni határ védelmi feladatait – esetleg nagyban támogató – UAV alkalmazásokról érdemben véleményt mondjon. További kutatások tárgyát képezheti, hogy a máshol már eredményesen alkalmazott technikai-technológiai eszközök és módszerek miért nem terjedtek el hazánkban is, legalábbis azon a szinten, hogy a határvédelemben az egyes partnerek ismerjék a lehetséges eszközök arzenálját.

3.3.5 A Delta-csoport kérdőíveinek előzetes statisztikai adatai

A Delta-csoport összesen 20 elemű halmaz. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait a 4. táblázat foglalja össze.

A Delta-csoport statisztikai adatai

4. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
20	100	20	100	0	0	13	65	12	≈ 92,3

A 4. táblázat alapján elmondható, hogy:

- ☺ a postázott kérdőívek (20 darab) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége kiértékelhető.
- ☺ A kézbesített 20 felkérésre 13 válasz érkezett (65 %), a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető.

☺ A kérdőívet 12 szervezet töltötte ki, ami a megválaszolt felkérések $\cong 92,3$ %-a.

A *Delta*-csoport tevékenységéről összességében elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes (20) hazai szervezete felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. Figyelemre méltó azonban, hogy a partnerek 65 %-a adott választ a megkeresésre, ami – tekintettel e csoport speciális, katasztrófavédelmi feladataira – egyáltalán nem mondható magas részvételi aránynak.

IV. KÖVETKEZTETÉSEK

A pilóta nélküli repülőgépek lehetséges alkalmazásának területeit, egy országos szinten, sok tekintetben reprezentatív kérdőíves felméréses módszer segítségével, elemeztem. A kutatás fő céljai az alábbiak voltak:

- ☞ megvizsgálni, hogy egy adott témakörben milyen aktivitással nyilatkoznak a meginterjúvált szereplők?
- ☞ megvizsgálni, hogy milyen a téma aktualitása, beágyazottsága az egyes szakmák gondolkodásában?
- ☞ ha az egyes szakmák ismerik, akkor milyen képességeket várnak el egy UAV repülőeszköztől?
- ☞ bár nem képezte a vizsgálatok központi helyét és kiemelt tárgyát, de fontos volt megvizsgálni, hogy szükségesnek, esetleg lehetségesnek tartják-e az egyes szakmai körök az UAV alkalmazásokat?!

E fejezet négy szakmai szervezet előzetes statisztikai adatait mutattam be. A statisztikai adatok előzetes kiértékeléséhez követelményeket határoztam meg, hogy milyen feltételek mellett lehet elfogadni a „csoport” véleményét szakmai reprezentatív véleményként. A bemutatott négy csoport adatszolgáltatási aktivitása alapján mind értékelhető adatot adott, de a *Charlie*-, és a *Delta*-csoportok tevékenysége és aktivitása az előre meghatározott statisztikai minimumokat alig meghaladó paraméterekkel jellemezhető. E csoportok kiemelt jelentőséggel rendelkeznek ma is, és vélelmezhetően a klímaváltozás negatív hatása erősíti és kiterjeszti majd szerepüket főleg a katasztrófavédelemben, valamint a határvédelemben.

Az egyes válaszadói csoportok adatait, és a következtetéseket az I. fejezet mutatja be részletesen.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://robotslife.wordpress.com/2008/08/13/guardium-ugv-robo-buggy-patrols-video/>
- [2] <http://www.rsjpo.army.mil/>
- [3] <http://www.masshightech.com/stories/2008/10/06/weekly7-MITs-latest-robot-sub-is-g geared-for-long-term-submergence.html>
- [4] <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/subs.html>
- [5] <http://www.origo.hu/tudomany/20120326-deepsea-challenge-halakat-nem-csak-rakokat-latott-a-marianaarokban-james.html>

[6] SZABOLCSI, R., Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata, Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, p(59–65), Debrecen, 2007.

[7] Dorf, R. C. – Bishop, R. H. *Modern Control Systems*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2001.

[8] www.heiszwolf.com/albacore

[9] www.hazegray.com

[10] www.ussalbacore.org



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. FEJEZET

UAV ALKALMAZÁSOK, ALKALMAZÓI ELVÁRÁSOK MEGHATÁROZÁSA



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. RÉSZ

AZ ALPHA-CSOPORT

A pilóta nélküli repülőgépekkel szemben az alkalmazók által támasztott követelmények vizsgálata elsődleges fontosságú e légi járművek képességeinek vizsgálata területén. Az elmúlt évben elvégzett, és a „Műszaki tudomány az Észak-Alföldi régióban 2007” tudományos konferencián közölt első eredmények alapján a szerző az egyik válaszadó csoport, az ALPHA-csoport válaszait veszi górcső alá, és mutatja be a csoport pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott alkalmazói elvárásait.

I. BEVEZETÉS, PROBLÉMAFELVETÉS, AKTUALITÁS

A pilóta nélküli repülőgépek egyre szélesebb körben nyernek alkalmazást az élet különféle területein. A lehetséges alkalmazásokat két nagy csoportba oszthatjuk, amelyek a katonai-, illetve a polgári alkalmazások. Tekintettel arra, hogy az alkalmazók jelentős köre a polgári szférából kerül ki, ily módon e cikkben egy olyan, polgári tevékenységet folytató válaszadói csoportra koncentrálunk, amely, tekintettel a klímaváltozás hatásaira, valamint az Európai Unió klímaváltozással kapcsolatos irányelveire, és határozataira, elsődleges fontosságúnak tekinthető.

II. AZ ALPHA-CSOPORT FONTOSABB JELLEMZŐI

2.1. Az Alpha-csoport kérdőíveinek értékelése

Az „ALPHA-csoport” összesen 10 elemű halmaz. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait az 1. táblázat foglalja össze.

Az ALPHA-csoport statisztikai adatai

1. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
10	100	10	100	0	0	7	70	6	≅ 85,71

Az 1. táblázat alapján elmondható, hogy:

- ☺ a postázott kérdőívek (10 darab) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége kiértékelhető.
- ☺ A kézbesített 10 felkérésre 7 válasz érkezett (70 %), a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető.
- ☺ A kérdőívet 6 fő töltötte ki, ami a megválaszolt felkérések 85,71 %-a.

Az „ALPHA-csoport” tevékenységéről összességében elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes (10) hazai szervezete felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. A csoport szakemberei az UAV-k alkalmazási területeiről széleskörű ismeretekkel rendelkeznek. A csoport szakmai elméleti-gyakorlati ismereteiben a téma beágyazott, az UAVk alkalmazásáról pozitívan nyilatkoznak. A csoport aktívan vett részt a kérdőív kitöltésében.

III. A FELMÉRÉS FONTOSABB EREDMÉNYEI, ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A továbbiakban a 6 válaszadót, mint önállóan véleményt formáló szakmai véleményt vesszük figyelembe. Tekintsük át az egyes kérdésekre adott válaszokat, és értékeljük azokat.

1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!

- 1 fő – fekete-fehér video jel
- 3 fő – színes PAL-szabványú video jel
- 2 fő – infra kamera jel
- 3 fő – egyéb jel
- 1 fő: hőkép, megfelelő részletgazdagság;
- 1 fő: bármilyen jel, ami megfelel az adott alkalmazási célnak;
- 1 fő: digitális fotó.

Következtetések: a kérdésre adott válaszokból kiderül, hogy a válaszadók többsége a színes video jel, valamint az infra kamera jelre tart igényt. Megemlíteni szükséges, hogy a válaszadók a megfelelő részletgazdagságú digitális fotókat is előnyben részesítik.

2. Adja meg, hogy Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- 3 fő – tavasz
- 2 fő – nyár
- 1 fő – ősz
- 2 fő – tél
- 4 fő – minden évszak

Következtetések: a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV esetleges alkalmazásai nem korlátozottak évszakok szerint – az UAV és fedélzeti rendszerei képesnek kell lennie minden évszakban a repülésre.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- 6 fő – száraz, csapadékmentes idő

1 fő – csapadékos idő

1 fő – eső

1 fő – hó

0 fő – köd

0 fő – zúzmara

4 fő – szélcsendes idő

3 fő – szeles idő

*a szél iránya a repülés irányára**

ellenszél erőssége

0 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)

1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)

0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)

0 fő – ≥ 10 m/s

oldalszél erőssége

0 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)

1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)

0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)

0 fő – ≥ 10 m/s

hátszél erőssége

0 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)

1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)

0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)

0 fő – ≥ 10 m/s

*hőmérsékleti tartomány***

1 fő – (-50 °C ÷ -30 °C)

2 fő – (-30 °C ÷ 0 °C)

2 fő – (0 °C ÷ +20 °C)

1 fő – (+20 °C ÷ +60 °C)

Más időjárási feltételek

1 fő – éjszaka és nappal egyaránt

1 fő – Real-time, vagy GPR-track esetén a szél majdnem mindegy, amennyiben lehetővé tesz a repülést;

1 fő – ez is az alkalmazás, illetve a hordozott érzékelők függvénye.

1 fő – felhőtlen égbolt.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Következtetések:

- 1) A válaszadók jelentős része úgy száraz-, mint csapadékos időben is szeretné alkalmazni a pilóta nélküli repülőgépet – a csapadék formája gyakorlatilag az esőre, és a óra korlátozódik.
- 2) A repülésnek úgy szélcsendes, mint szeles időben meg kell történnie. Tekintettel a megjelölt szél-sebességi értékekre a repülés gyenge szélben kell, hogy megtörténjen.
- 3) A környezeti hőmérsékletre adott válaszokból kiderül, hogy a válaszadók egy része fagypont feletti hőmérsékleti tartományban alkalmazná az UAV-kat, egy másik részük viszont nagyon alacsony környezeti hőmérsékletet is megjelölt. Tekintettel eme szélsőséges értékekre elmondhatjuk, hogy hazánkban reálisan elegendő számolni a – 30 °C alsó hőmérsékleti tartománnyal, míg a környezeti hőmérséklet felső értéke – gyakorlatilag – nem korlátozott.
- 4) Fontos követelmény, hogy a válaszadók szerint úgy nappal, mint éjszaka egyaránt szükséges az UAVk repülése.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

Repülési magasság

- 2 fő – (10 m ÷ 50 m)
- 3 fő – (50 m ÷ 100 m)
- 3 fő – (100 m ÷ 200 m)
- 4 fő – (200 m ÷ 500 m)
- 2 fő – (500 m ÷ 1000 m)
- 0 fő – ≥ 1000 m
- 1 fő – ≤ 2000 m
- 0 fő – Más magasság:m

Repülési sebesség

- 4 fő – (40 km/h ÷ 60 km/h)
- 3 fő – (60 km/h ÷ 80 km/h)
- 0 fő – (80 km/h ÷ 100 km/h)
- 0 fő – (100 km/h ÷ 150 km/h)
- 0 fő – ≥ 150 km/h
- 1 fő – Más sebesség: (10÷40) km/h

Következtetések:

- 1) Az UAV-k elvárt repülési magassága tipikusan a $H = (10 \div 500) m$ tartományban helyezkedik el. A repülési magasság maximális értéke a $H_{max} = 1000 m$ tartományba esik.

- 2) Az UAV-k elvárt repülési sebessége a $v = (40 \div 80) \text{ km/h}$ tartományba esik. Egy válaszadó azonban olyan repülési sebességtartományt jelölt meg ($v_{\min} = (10 \div 40) \text{ km/h}$), amely előre vetíti, hogy az UAV helikopter, vagy quadrotor elrendezésű légi jármű kell, hogy legyen.

5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- 1 fő – (100 m ÷ 200 m)
- 1 fő – (200 m ÷ 500 m)
- 1 fő – (500 m ÷ 1000 m)
- 2 fő – (1 km ÷ 5 km)
- 2 fő – (5 km ÷ 10 km)
- 4 fő – (10 km ÷ 20 km)
- 1 fő – (20 km ÷ 50 km)
- 0 fő – $\geq 50 \text{ km}$
- 0 fő – Más hatótávolság: km.

Következtetések:

- 1) Az UAV-k elvárt repülési hatótávolsága a válaszadók többsége számára a $L = (100 \div 20000) \text{ m}$ tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy a repülés, jó időjárási viszonyok között is a vizuális látóhatáron túlra történik.
- 2) A válaszadók közül azonban egy fő az $L = (20 \div 50) \text{ km}$ hatótávolságot jelölte meg elvárt követelményként.

6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!

- 1 fő – (5 ÷ 10) perc
- 1 fő – (10 ÷ 15) perc
- 1 fő – (15 ÷ 20) perc
- 1 fő – (20 ÷ 30) perc
- 3 fő – (30 ÷ 60) perc
- 2 fő – (1 ÷ 1,5) óra
- 3 fő – (1,5 ÷ 2) óra
- 1 fő – Más idő: (3÷4) óra

Következtetések:

A válaszadók által megadott értékek alapján elmondható, hogy a repülési idő tipikusan a $t_{\text{rep}} = (5 \div 120) \text{ perc}$ tartományba esik, maximális értéke pedig – egy válaszadó szerint – (3÷4) óra.

7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!

- 3 fő – (1 km/h ÷ 5 km/h)
- 4 fő – (5 km/h ÷ 10 km/h)
- 2 fő – (10 km/h ÷ 20 km/h)
- 2 fő – (20 km/h ÷ 50 km/h)
- 0 fő – (50 km/h ÷ 100 km/h)
- 0 fő – ≥ 100 km/h

Következtetések:

- 1) A megfigyelés tárgyát képező tárgyak, objektumok a válaszadók egy jelentős csoportja esetében $v = (1 \div 10) \text{ km/h}$ sebességgel, azaz lassan mozognak.
- 2) A válaszadók másik csoportja megjelölt egy meglehetősen nagy sebességet is, amely a $v = (10 \div 50) \text{ km/h}$ tartományba esik. Elmondhatjuk tehát, hogy a megfigyelni kívánt objektumok maximális sebessége $v_{\max} \leq 50 \text{ km/h}$.

8. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen látási viszonyok mellett, és mely repülési távolságon véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

VFR (Visual Flight Rules) repülés — kézi repülés vizuális látótávolságon belüli távolságra

- 3 fő – (100 m ÷ 500 m)
- 2 fő – (500 m ÷ 1000 m)
- 1 fő – (1 km ÷ 1,5 km)
- 1 fő – 1,5 km ÷ 2 km)
- 1 fő – ≥ 2 km
- 0 fő – Más távolság

IFR (Instrument Flight Rules) repülés — műszeres kézi, vagy automatizált repülés a vizuális látóhatáron túl

- 3 fő – < 1 km
- 2 fő – (1 km ÷ 2 km)
- 2 fő – (2 km ÷ 3 km)
- 2 fő – (3 km ÷ 5 km)
- 2 fő – (5 km ÷ 10 km)
- 1 fő – (10 km ÷ 20 km)
- 0 fő – ≥ 20 km
- 0 fő – Más távolság

Következtetések:

- 1) A válaszadók az UAV kézi irányítását az $L_{VFR} = (500 \div 2000) m$ tartományban tartják szükségesnek.
- 2) A válaszadók az UAV műszeres kézi-, vagy automatizált irányítását – tipikusan – az $L_{IFR} = (1 \div 20) km$ tartományban tartják szükségesnek.

9. Szükségesnek tartja-e a pilóta nélküli repülőgép védelmét?

1 fő – igen

4 fő – nem

Következtetések:

Tekintettel az APLHA-csoport tevékenységének jellegére, az UAVk védelme ebben a szektorban nem szükséges.

10. Adja meg a pilóta nélküli repülőgép védelmének lehetséges módszereit!

0 fő – minimális méretű sárkányszerkezet;

1 fő – kompozit anyagok alkalmazása az építésben;

0 fő – speciális törzs-, és szárnyprofilok alkalmazása;

1 fő – speciális színű festés;

4 fő – csendes motor;

1 fő – egyéb módszerek és eljárások

Gyenge minőségű terepről történő üzemeltetés lehetősége

Következtetések:

A válaszadók a speciális színű, kompozit építésű UAV alkalmazását jelölték meg, illetve a csendes motor alkalmazását (4 fő, $\approx 66\%$) várják el. Mindezek mellett, a rossz terepviszonyok mellett történő üzemeltetés lehetőségét is elvárják az alkalmazók.

11. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?

4 fő – villamos motor

0 fő – dugattyús, belsőégésű motor

1 fő – egyéb meghajtás

Csendes, dugattyús motor

Következtetések:

A válaszadók egyértelműen a villamos motort jelölték meg a repüléshez szükséges vonó/toló erő előállításához. Tekintettel azonban a válaszadóknak a repülési sebesség, a repülési idő, a repülés hatótávolságra adott válaszaikra, e válasz a megfelelő kritikával vehető figyelembe.

12. Milyen kormányvezérlés alkalmazását javasolja?!

- 2 fő – hagyományos (csűrőlap+oldalkormány+magassági kormány)
- 0 fő – pillangó vezérlések
- 0 fő – egyéb vezérlések

Következtetések:

A válaszadók meglehetősen passzívok voltak e kérdés megválaszolásában. Mindazonáltal, a hagyományos kormányvezérlés mellett tették le legtöbben a voksukat.

13. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen rendelkezésre állási idő² mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?

- 0 fő – < 5 perc
- 0 fő – (5 perc ÷ 10 perc)
- 0 fő – (10 perc ÷ 20 perc)
- 0 fő – (20 perc ÷ 30 perc)
- 2 fő – (30 perc ÷ 60 perc)
- 2 fő – (1 óra ÷ 2 óra)
- 3 fő – (2 óra ÷ 5 óra)

Más idő:

- 2 fő – 24 óra.
- 1 fő – előzetes egyeztetés alapján.

Következtetések:

- 1) A válaszadók döntő többsége a $t_{rend} = (30 \div 300)$ perc készenléti idő tartományát tartják szükségesnek. Megemlíteni szükséges, hogy a készenléti idő maximális értékére a $t_{rend_{max}} \leq 24$ óra időt jelölték meg.
- 2) Tekintettel az ALPHA-csoport felelősségi területének nagyságára, a domborzati-, és a klimatikus viszonyokra, valamint a készenléti idő tartományára, és annak maximális értékére – a csoport minden egyes szervezetének rendelkezni kellene egy mobil egységgel, amely magába foglalja az UAVt, a földi üzemeltetési rendszer szükséges elemeit, és a megfelelően kiképzett földi irányító-kezelő személyzetet is.

² A megbízó repülésre vonatkozó döntéshozatalától a repülési feladattal megbízott felszállás helyére történő kiérkezéséig eltelt idő.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

14. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készségi idő³ mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?

- 0 fő – < 3 perc
- 0 fő – (3 perc ÷ 5 perc)
- 0 fő – (5 perc ÷ 10 perc)
- 0 fő – (10 perc ÷ 20 perc)
- 2 fő – (20 perc ÷ 30 perc)
- 4 fő – (30 perc ÷ 60 perc)
- 3 fő – ≥ 60 perc

Következtetések:

A válaszadók többsége által megadott készségi idő értéke $t_{készségi} = (20 \div 60) \text{ perc}$. Megemlíteni szükséges azonban, hogy 3 fő $t_{készségi} \geq 60 \text{ perc}$ készségi időt is megadott.

15. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 2 fő – automatizált felszállás | 1 fő – automatikus bejövétel |
| leszálláshoz | |
| 4 fő – térbeli szöghelyzet stabilizálása | 2 fő – automatikus leszállás (flare) |
| 3 fő – repülési sebesség stabilizálása | 1 fő – oldalkoordináta stabilizálás |
| 2 fő – kismagasságú repülés | 4 fő – repülési magasság stabilizálás |
| 5 fő – programozott útvonalrepülések | |
| 1 fő – egyéb üzemmódok | |
| Digitális ortofotó készítése | |

Következtetések:

A válaszadók az alábbi automatizálási feladatok megoldását tartották szükségesnek:

- 1) automatikus fel-, és leszállás;
- 2) térbeli szöghelyzet (dőlés, bólintás, irány) stabilizálás;
- 3) repülési sebesség stabilizálása;
- 4) kismagasságú repülések automatizálása (repülési magasság stabilizálása, emelkedés, süllyedés, egyéb más, magasság változtatással járó manőverek);
- 5) programozott útvonalrepülések (a felszállás és a leszállás helye között).

³ A repülési feladattal megbízott felszállásra kiadott utasítása és az UAV felszállása között eltelt idő.

16. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek automatizált repülési fázisaiban milyen statikus stabilizálási pontatlansággal rendelkezzen az UAV?

- 0 fő – bólintási szög stabilizálásának hibája
- 0 fő – bedöntési szög stabilizálásának hibája
- 0 fő – irányszög stabilizálásának hibája
- 0 fő – állásszög
- 0 fő – csúszásszög
- 1 fő – megtett út stabilizálásának hibája: 500 m
- 1 fő – repülési magasság stabilizálásának hibája: 50 m
- 0 fő – oldalkoordináta stabilizálásának hibája
- 1 fő – repülési sebesség stabilizálásának hibája: 10 km/h
- 0 fő – függőleges sebesség stabilizálásának hibája
- 0 fő – oldalirányú sebesség
- 0 fő – egyéb repülési paraméter statikus hibája

Következtetések:

A válaszadók e kérdést túlságosan is specifikusnak tartották, mindösszesen egy fő adott részlegesen választ e kérdésre. Tekintettel azonban a korábban adott válaszokra, az itt megadott statikus hibaértékek túlságosan is nagy értékűnek tűnnek, így javasolt, hogy a statikus hiba értékei a szabályozástechnikában általánosan elfogadott (2÷5) tartományba essenek.

17. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek repülése, illetve az egyes automatikus repülési üzemmódokon javasolt-e repülésbiztonsági korlátozások alkalmazása?

- 3 fő – korlátozás javasolt
- 1 fő – korlátozás nem javasolt

Következtetések:

A válaszadók többsége szükségesnek tartotta az egyes repülési üzemmódokon a korlátozások alkalmazását.

18. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy Ön szerint a pilóta nélküli repülőgépek repülési paraméterei milyen légi üzemeltetési korlátozással bírnak?

- 0 fő – bólintási szög maximális értéke
- 0 fő – bedöntési szög maximális értéke
- 1 fő – az irányszög változás maximális értéke: (1÷3) fok
- 0 fő – az állásszög maximális értéke

- 0 fő – a csúszásszög maximális értéke
 - 0 fő – repülési magasság maximális értéke
 - 0 fő – az oldalkoordináta maximális értéke
 - 0 fő – a repülési sebesség maximális értéke
 - 0 fő – a függőleges sebesség maximális értéke
 - 0 fő – az oldalirányú sebesség maximális értéke
 - 2 fő – egyéb repülési paraméter korlátozása
- Repülési magasság minimuma: $(150 \div 200)$ m;
Minimális repülési magasság

Következtetések:

A válaszadók a kérdést túlságosan is specifikusnak tartották, csak kevesen adtak értékelhető választ a kérdésre. Az egyik javasolt korlátozás az irányszög változásának maximális értékére vonatkozik, míg másik válaszadó a $H_{\min} = (150 \div 200) m$ repülési magasságot jelölte meg a minimális repülési magasság értékeként.

19. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!

- 0 fő – kivezetés vízszintes repülési helyzetbe
- 0 fő – átstartolás
- 2 fő – kényszerleszállás
- 0 fő – egyéb veszélyes repülési üzemmód
- 2 fő – tereptárgyak átrepülése
- 4 fő – tereptárgyak megkerülése

Következtetések:

A kérdés megválaszolása során a válaszadók az alábbi veszélyes üzemmódok automatizálásának szükségessége mellett döntöttek:

- 1) kényszerleszállás (az elérni kívánt cél egyértelmű megfogalmazása után a földfelszín megközelítéséhez szükséges pályaszakasz megtervezése, és a megközelítési algoritmus felállítása mindenképpen szükséges);
- 2) tereptárgyak átrepülése (veszélyes, forszírozott üzemi emelkedés, amely vízszintes, egyenes-vonalú repülési fázissal fejeződik be. Az átrepülni kívánt tereptárgyak lehetséges körét, és azok geometriai jellemzőit pontosítani szükséges, és ehhez a manőverhez algoritmust kell kidolgozni);
- 3) tereptárgyak megkerülése (kitérő manőverek definiálása, és a repülési pálya megtervezése elengedhetetlenül szükséges).

20. Ön a szakterületén milyen gyakorisággal használná a pilóta nélküli repülőgépet?!

0 fő – naponta

0 fő – egy alkalommal

0 fő – több alkalommal

0 fő – hetente

0 fő – egy napon

0 fő – több napon

5 fő – havonta

2 fő – egy héten

3 fő – több héten

1 fő – esetleg évente, (2÷3) évente;

1 fő – alkalmanként

1 fő – csak tesztelés volt

Következtetések:

A kérdés megválaszolásakor az UAV alkalmazásának gyakoriságára a válaszadók többsége a havonként, főleg heti rendszerességgel, és több héten keresztül javasolja alkalmazni a pilóta nélküli repülőgépeket.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

IV. ÖSSZEFOGLALÁS, EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A pilóta nélküli repülőgépek lehetséges alkalmazási területeit, illetve a repülőgépekkel szemben támasztott műszaki követelményeit, és képességeit – az ALPHA-csoport válaszai alapján – a 2. Táblázatban foglaltuk össze.

Az ALPHA-csoport által megfogalmazott műszaki követelményeik

2. táblázat

Az ALPHA-csoport pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelményei			
Fsz.	Az elvárt képesség (műszaki követelmény) megnevezése	A követelmény leírása, értéke	
1.	Függesztmény	Infra kamera, színes video kamera, digitális fotó	
2.	A repülések időjárási feltételei	Minden évszak, csapadékos (esős, hóeséses) idő, szélcsendes, gyenge-, és közepesen erős szél, ($-30\text{ °C} \div +60\text{ °C}$) hőmérsékleti tartomány.	
3.	Repülési magasság tartománya	$H = (10 \div 1000) m$ ($H_{\max} \geq 2000 m$)	
4.	Repülési sebesség tartománya	$v = (40 \div 80) km/h$, ($v = (10 \div 40) km/h$)	
5.	Hatótávolság	$L_1 = (100 \div 20000) m$, ($20 km \leq L_{\max} \leq 50 km$)	
6.	Repülési idő	$t_{rep} = (5 \div 120) perc$, $3 óra \leq t_{rep_{\max}} \leq 4 óra$	
7.	Megfigyelt objektum, személyek sebessége	$v_1 = (1 \div 10) km/h$, ($v_{\max} \leq 50 km/h$)	
8.	Repülési távolság	$L_{VFR} = (100 \div 2000) m$, $L_{IFR} = (1 \div 20) km$	
9.	Rendelkezésre állási idő	$t_{rend} = (30 \div 300) perc$, $t_{rend_{\max}} = 24 óra$	
10.	Készültségi idő	$t_{készült} = (20 \div 60) perc$	
11.	Automatizált repülési üzemmódok	Automatikus fel-, és leszállás; Térbeli szöghelyzet stabilizálása; Repülési sebesség stabilizálása; Kismagasságú repülések automatizálása; Programozott útvonalrepülés Repülési magasság stabilizálása	
12.	Repülési paraméterek stabilizálásának statikus hibája	Megtett út	500 m
		Repülési magasság	50 m
		Repülési sebesség	10 km/h
13.	A légi üzemeltetés korlátozásai	$H_{\min} = 150 \div 200) m$, $\Delta\psi \leq (1 \div 3)^\circ$	
14.	Veszélyes repülési üzemmódok automatizálása	Kényszerleszállás Tereptárgyak átrepülése Tereptárgyak megkerülése	
15.	A repülés gyakorisága	Havonta, több héten keresztül. Napi-, vagy heti rendszerességgel. Szükség esetén, alkalmoszerűen.	



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A 2. Táblázat nagyban segítheti az UAV földi, és légi üzemeltetésének megbízhatóságát, és a repülésbiztonságot. A cikkben a szerző bemutatták egy válaszadó célcsoport által szolgáltatott adatok kiértékelését, a válaszok kritikai elemzését, és elvégezték a pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények egységes rendszerbe foglalását. Az eredmények alapjául szolgálhatnak valós UAV-rendszerek előzetes-, illetve prototípus-tervezésekor. A szerző még számos hasonló tartalmú válaszadói csoport tevékenységét értékeli ki, amíg egy olyan követelményrendszert állít fel, amit az UAV polgári alkalmazásai területén általánosan elfogadhatónak mondhatunk.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.

II. RÉSZ

A BRAVO-CSOPORT

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

A pilóta nélküli repülőgépekkel szemben az alkalmazók által támasztott követelmények vizsgálata elsődleges fontosságú e légi járművek képességeinek vizsgálata területén. A „Műszaki tudomány az Észak-Alföldi régióban 2007” tudományos konferencián közölt első, előzetes eredmények alapján a szerző az egyik válaszadó csoport, a BRAVO-csoport válaszait veszi górcső alá, és mutatja be a csoport pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott alkalmazói elvárásait.

I. BEVEZETÉS, PROBLÉMAFELVETÉS, AKTUALITÁS

A pilóta nélküli repülőgépek egyre szélesebb körben nyernek alkalmazást az élet különféle területein. A lehetséges alkalmazásokat két nagy csoportba oszthatjuk, amelyek a katonai–, illetve a polgári alkalmazások.

Tekintettel arra, hogy az alkalmazók jelentős köre a polgári szférából kerül ki, ily módon e cikkben egy olyan, polgári tevékenységet folytató válaszadói csoportra koncentrálnak, amely, tekintettel a klímaváltozás hatásaira, valamint az Európai Unió klímaváltozással kapcsolatos irányelveire, és határozataira, elsődleges fontosságúnak tekinthető.

És hogy mennyire aktuális e téma?! 2008. március 14.-én a miskolci Herman Ottó Múzeum régészei Szádvárról robothelikopter segítségével készítettek légi felvételeket.

A sajátos domborzati viszonyok, valamint az időjárási sajátosságok aztán azt eredményezték, hogy – vélelmezhetően – egy erős széllelés „felkapta” a nagy értékű helikopter, amely így irányíthatatlanná vált, aztán eltűnt [2].

A keletkezett anyagi kár jelentős, és ily módon a Szádvár geometriai felmérésére hivatott régészeti kutatás is késlekedést szenved. A robothelikopter kézi irányítása során – vélelmezhetően – olyan meteorológiai viszonyok uralkodtak az adott térségben, amely esetén mindenképpen indokolt lett volna a repülés bizonyos fázisainak automatizálása [2].

II. A BRAVO-CSOPORT FONTOSABB JELLEMZŐI

2.1. A BRAVO-csoport kérdőíveinek értékelése

A BRAVO-csoport 13 elemű halmaz, amelynek 12 szervezete Magyarország teljes területét lefedi. Az egyes szervezetek felelősségi területeinek nagysága azonosnak mondható, bár a domborzati viszonyok, az időjárási viszonyok, az egyes területek bejárhatósága, valamint más mutatókban is lényeges mértékben eltérnek egymástól.

A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait a 2. táblázat foglalja össze [1].

 MAGYARORSZÁG MEGÚJUL  A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
---	--

A BRAVO-csoport statisztikai adatai

1. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
13	100	13	100	0	0	10	76,92	11	110

Az 1. táblázat alapján elmondható, hogy [1]:

- ☺ a postázott kérdőívek (13 darab, amely 12 szervezetet, és egy jogi személyiséget takar) mind kézbesítésre kerültek (100 %). A csoport tevékenysége tehát kiértékelhető.
- ☺ A kézbesített 13 felkérésre 10 partnertől (9 szervezet, egy jogi személyiség, $\cong 76,92$ %) érkezett válasz, a csoport adatszolgáltató tevékenysége tehát kiértékelhető. Megemlíteni szükséges, hogy a válaszadásra felkért 12 szakmai szervezet közül 3 nem válaszolt a megkeresésre.
- ☺ A 11 visszaküldött és kitöltött kérdőívet 8 partner (7 szervezet, és egy jogi személyiség) töltötte ki, illetékességi okok miatt egy szervezet 4 osztálya is megküldte a kitöltött kérdőíveket. A kitöltött kérdőívek aránya megválaszolt felkérésekhez képest 110 %, vagyis a csoport adatszolgáltatási tevékenysége kiértékelhető.

A BRAVO-csoport tevékenységéről elmondható: a csoport reprezentatív, a csoport összes hazai szervezete (12) felkérést kapott a kérdőív kitöltésére. A megkérdezett 12 szervezet közül 7 ($\cong 58,33$ %) válaszolt a kérdőív kitöltésével, 2 szervezet ($\cong 16,66\%$) jelezte, hogy kompetencia hiányában nem tudja kitölteni a kérdőívet, és végezetül, 3 szervezet (25%) semmilyen módon sem reagált a megkeresésre [1].

III. A FELMÉRÉS FONTOSABB EREDMÉNYEI, ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A továbbiakban a 11 válaszadót, mint önállóan véleményt formáló szakmai véleményt vesszük figyelembe. Tekintsük át az egyes kérdésekre adott válaszokat, és értékeljük azokat.

1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!

0 fő – fekete-fehér video jel

7 fő – színes PAL-szabványú video jel

6 fő – infra kamera jel

1 fő – egyéb jel, színes fényképfelvétel, ortografikus formában

Következtetések: a kérdésre adott válaszokból egyértelműen kiderül, hogy a válaszadók szignifikáns többsége a színes video jel, valamint az infra kamera jelre tart igényt.

2. Adja meg, hogy Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- | | |
|----------------------|-------------|
| 2 fő – tavasz | 1 fő – nyár |
| 0 fő – ősz | 0 fő – tél |
| 8 fő – minden évszak | |

Következtetések: a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV esetleges alkalmazásai nem korlátozottak évszakok szerint – az UAV és fedélzeti rendszerei képesnek kell lennie minden évszakban a repülésre.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- 8 fő – száraz, csapadékmentes idő
- 7 fő – csapadékos idő
 - 5 fő – eső
 - 3 fő – hó
 - 1 fő – köd
 - 1 fő – zúzmara
- 8 fő – szélcsendes idő
- 7 fő – szeles idő

a szél iránya a repülés irányára

ellenszél erőssége

- 1 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)
- 1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)
- 0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)
- 0 fő – ≥ 10 m/s

oldalszél erőssége

- 1 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)
- 1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)
- 0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)
- 0 fő – ≥ 10 m/s

hátszél erőssége

- 1 fő – (0,5 m/s ÷ 1 m/s)
- 1 fő – (1 m/s ÷ 3 m/s)



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

0 fő – (3 m/s ÷ 10 m/s)

0 fő – ≥ 10 m/s

hőmérsékleti tartomány

1 fő – (-50 °C ÷ -30 °C)

1 fő – (-30 °C ÷ 0 °C)

3 fő – (0 °C ÷ +20 °C)

3 fő – (+20 °C ÷ +60 °C)

Következtetések:

- 1) A válaszadók jelentős része úgy száraz-, mint csapadékos időben is szeretné alkalmazni a pilóta nélküli repülőgépet – a csapadék formája gyakorlatilag az esőre, és a hóra korlátozódik.
- 2) A repülésnek úgy szélcsendes, mint szeles időben meg kell történnie. Tekintettel a megjelölt szél-sebességi értékekre a repülés gyenge-, és közepes szélben kell, hogy megtörténjen. Tekintettel azonban arra, hogy mindössze egy fő válaszolt erre a kérdésre, a válasz semmiképpen sem tekinthető e csoportra szignifikánsnak.
- 3) A környezeti hőmérsékletre adott válaszokból kiderül, hogy a válaszadók többsége csak fagypont feletti hőmérsékleti tartományban alkalmazná az UAV-kat. Egy-egy fő azonban nagyon alacsony környezeti hőmérsékletet is megjelölt. Tekintettel eme szélsőséges értékekre elmondhatjuk, hogy hazánkban reálisan elegendő számolni a – 30 °C alsó hőmérsékleti tartománnyal, míg a környezeti hőmérséklet felső értéke – gyakorlatilag – nem korlátozott.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

Repülési magasság

0 fő – (10 m ÷ 50 m)

2 fő – (50 m ÷ 100 m)

4 fő – (100 m ÷ 200 m)

1 fő – (200 m ÷ 500 m)

3 fő – (500 m ÷ 1000 m)

1 fő – ≥ 1000 m

0 fő – ≤ 2000 m

0 fő – Más magasság:m

Repülési sebesség

3 fő – (40 km/h ÷ 60 km/h)



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

- 2 fő – (60 km/h ÷ 80 km/h)
- 2 fő – (80 km/h ÷ 100 km/h)
- 1 fő – (100 km/h ÷ 150 km/h)
- 0 fő – ≥ 150 km/h
- 0 fő – Más sebesség:km/h

Következtetések:

- 1) Az UAV-k elvárt repülési magassága a $H = (50 \div 1000) m$ tartományban helyezkedik el. Természetesen, a repülési magasság maximális értéke korlátozott, nem csak a fedélzeti érzékelők, hanem a motor teljesítmény oldaláról is.
- 2) Az UAV-k elvárt repülési sebessége a $v = (40 \div 100) km/h$ tartományba esik, bár egy válaszadó ettől nagyobb repülési sebességet is megadott. Így tehát, a repülési sebesség maximális értéke $v_{\max} = 150 km/h$.

5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

- 0 fő – (100 m ÷ 200 m)
- 0 fő – (200 m ÷ 500 m)
- 2 fő – (500 m ÷ 1000 m)
- 3 fő – (1 km ÷ 5 km)
- 0 fő – (5 km ÷ 10 km)
- 1 fő – (10 km ÷ 20 km)
- 4 fő – (20 km ÷ 50 km)
- 3 fő – ≥ 50 km
- 0 fő – Más hatótávolság: km.

Következtetések:

- 1) Az UAV-k elvárt repülési hatótávolsága, a válaszadók egy jelentős része számára a $L = (500 \div 5000) m$ tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy a repülés, jó időjárási viszonyok között is a vizuális látóhatáron túlra történik.
- 2) A válaszadók másik nagy csoportja az $L = (10 \div 50) km$, valamint az attól nagyobb hatótávolságot jelölte meg elvárt követelményként. Elmondhatjuk tehát, hogy az elvárt hatótávolság maximális értéke: $L_{\max} \geq 50 km$. Tekintettel arra, hogy 3 fő is ezt a hatótávolságot jelölte meg, de nem pontosította az elvárásait, ily módon, az előzetes számítások során legyen ez az érték 100 km. Megjegyezzük, hogy ezt a követelményt a későbbiekben pontosítani szükséges.

6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!

- 0 fő – (5 ÷ 10) perc
- 0 fő – (10 ÷ 15) perc
- 1 fő – (15 ÷ 20) perc
- 2 fő – (20 ÷ 30) perc
- 3 fő – (30 ÷ 60) perc
- 3 fő – (1 ÷ 1,5) óra
- 3 fő – (1,5 ÷ 2) óra
- 0 fő – Más idő: óra

Következtetések:

A válaszadók által megadott értékek alapján elmondható, hogy a repülési idő $t_{rep} = (15 \div 120)$ perc, maximális értéke tehát 2 óra.

7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!

- 3 fő – (1 km/h ÷ 5 km/h)
- 1 fő – (5 km/h ÷ 10 km/h)
- 0 fő – (10 km/h ÷ 20 km/h)
- 2 fő – (20 km/h ÷ 50 km/h)
- 0 fő – (50 km/h ÷ 100 km/h)
- 0 fő – ≥ 100 km/h

Következtetések:

- 1) A megfigyelés tárgyát képező tárgyak, objektumok a válaszadók egy jelentős csoportja esetében $v = (1 \div 10)$ km/h sebességgel, azaz lassan mozognak.
- 2) A válaszadók másik csoportja megjelölt egy meglehetősen nagy sebességet is, amely a $v = (20 \div 50)$ km/h tartományba esik. Elmondhatjuk tehát, hogy a megfigyelni kívánt objektumok maximális sebessége $v_{max} \leq 50$ km/h.

8. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen látási viszonyok mellett, és mely repülési távolságon véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

VFR (Visual Flight Rules) repülés — kézi repülés vizuális látótávolságon belüli távolságra

- 0 fő – (100 m ÷ 500 m)
- 3 fő – (500 m ÷ 1000 m)

- 0 fő – (1 km ÷ 1,5 km)
- 1 fő – 1,5 km ÷ 2 km)
- 0 fő – ≥ 2 km
- 0 fő – Más távolság

IFR (Instrument Flight Rules) repülés — műszeres kézi, vagy automatizált repülés a vizuális látóhatáron túl

- 0 fő – < 1 km
- 2 fő – (1 km ÷ 2 km)
- 1 fő – (2 km ÷ 3 km)
- 0 fő – (3 km ÷ 5 km)
- 2 fő – (5 km ÷ 10 km)
- 2 fő – (10 km ÷ 20 km)
- 1 fő – ≥ 20 km
- 0 fő – Más távolság

Következtetések:

- 1) A válaszadók az UAV kézi irányítását az $L_{VFR} = (500 \div 2000) m$ tartományban tartják szükségesnek.
- 2) A válaszadók az UAV műszeres kézi-, vagy automatizált irányítását – tipikusan – az $L_{IFR} = (1 \div 20) km$ tartományban tartják szükségesnek. Az IFR tartomány maximális értéke azonban kitolódik a $L_{IFR_{max}} \geq 20 km$ tartományba is.

9. Szükségesnek tartja-e a pilóta nélküli repülőgép védelmét?

- 1 fő – igen 6 fő – nem

Következtetések:

Tekintettel a BRAVO-csoport tevékenységének jellegére, az UAVk védelme ebben a szektorban nem szükséges.

10. Adja meg a pilóta nélküli repülőgép védelmének lehetséges módszereit!

- 0 fő – minimális méretű sárkányszerkezet;
- 0 fő – kompozit anyagok alkalmazása az építésben;
- 0 fő – speciális törzs-, és szárnyprofilok alkalmazása;
- 0 fő – speciális színű festés;
- 1 fő – csendes motor;
- 0 fő – egyéb módszerek és eljárások

Következtetések:

A válaszadók közül egy fő jelölte meg a csendes motort. Tekintettel a válaszok jellegére, az UAV kiválasztásában a védelmi kérdések oldaláról – gyakorlatilag – nem korlátozza semmi a döntésünket.

11. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?

- 1 fő – villamos motor
- 4 fő – dugattyús, belsőégésű motor
- 0 fő – egyéb meghajtás

Következtetések:

A válaszadók egyértelműen a belsőégésű, dugattyús motort jelölték meg a repüléshez szükséges vonó/toló erő előállításához. Elmondhatjuk továbbá, hogy a válaszadók korábbi kérdésekre (pl. repülési idő, hatótávolság) adott válaszai e technológia szükségszerű alkalmazását előre is vetítették.

12. Milyen kormányvezérlés alkalmazását javasolja?!

- 2 fő – hagyományos (csűrőlap+oldalkormány+magassági kormány)
- 1 fő – pillangó vezérlések
- 0 fő – egyéb vezérlések

Következtetések:

A válaszadók meglehetősen passzívak voltak e kérdés megválaszolásában. Mindazonáltal, a hagyományos kormányvezérlés mellett tették le többen a voksukat.

13. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen rendelkezésre állási idő⁴ mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?

- 0 fő – < 5 perc
- 0 fő – (5 perc ÷ 10 perc)
- 1 fő – (10 perc ÷ 20 perc)
- 2 fő – (20 perc ÷ 30 perc)
- 2 fő – (30 perc ÷ 60 perc)
- 2 fő – (1 óra ÷ 2 óra)
- 0 fő – (2 óra ÷ 5 óra)

⁴ A megbízó repülésre vonatkozó döntéshozatalától a repülési feladattal megbízott felszállás helyére történő kiérkezéséig eltelt idő.

Más idő:

1 fő – 24 óra.

1 fő – (24 ÷ 48) óra.

Következtetések:

- 1) A válaszadók döntő többsége a $t_{rend} = (10 \div 120)$ perc készenléti idő tartományát tartják szükségesnek. Megemlíteni szükséges, hogy a készenléti idő maximális értékére $t_{rend_{max}} \leq 48$ óra időt jelölték meg.
- 2) Tekintettel a BRAVO-csoport felelősségi területének nagyságára, a domborzati-, és a klimatikus viszonyokra, valamint a készenléti idő tartományára, és annak maximális értékére – a csoport minden egyes szervezetének rendelkezni kellene egy mobil egységgel, amely magába foglalja az UAVt, a földi üzemeltetési rendszer szükséges elemeit, és a megfelelően kiképzett földi irányító-kezelő személyzetet is.

14. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készütségi idő⁵ mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?

0 fő – < 3 perc

0 fő – (3 perc ÷ 5 perc)

1 fő – (5 perc ÷ 10 perc)

0 fő – (10 perc ÷ 20 perc)

0 fő – (20 perc ÷ 30 perc)

1 fő – (30 perc ÷ 60 perc)

3 fő – ≥ 60 perc

1 fő – Más idő: (2-5) óra.

Következtetések:

A válaszadók többsége által megadott készütségi idő értéke $t_{készült} = (30 \div 300)$ perc. Megemlíteni szükséges azonban, hogy egy fő (5-10) perces készütségi időt is megadott. Így tehát a készütségi idő minimális értéke $t_{készült_{min}} = 5$ perc.

15. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!

3 fő – automatizált felszállás

3 fő – automatikus bejövétel leszálláshoz

3 fő – térbeli szöghelyzet stabilizálása

3 fő – automatikus leszállás (flare)

⁵ A repülési feladattal megbízott felszállásra kiadott utasítása és az UAV felszállása között eltelt idő.

- 3 fő – repülési sebesség stabilizálása
- 0 fő – oldalkoordináta stabilizálás
- 4 fő – kismagasságú repülés
- 6 fő – repülési magasság stabilizálás
- 4 fő – programozott útvonalrepülések
- 0 fő – egyéb üzemmódok

Következtetések:

A válaszadók az alábbi automatizálási feladatok megoldását tartották szükségesnek:

- 1) automatikus fel-, és leszállás;
- 2) térbeli szöghelyzet (dőlés, bólintás, irány) stabilizálás;
- 3) repülési sebesség stabilizálása;
- 4) kismagasságú repülések automatizálása (repülési magasság stabilizálása, emelkedés, süllyedés, egyéb más, magasság változtatással járó manőverek);
- 5) programozott útvonalrepülések (a felszállás és a leszállás helye között).

16. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek automatizált repülési fázisaiban milyen statikus stabilizálási pontatlansággal rendelkezzen az UAV?

- 0 fő – bólintási szög stabilizálásának hibája: fok
- 0 fő – bedöntési szög stabilizálásának hibája: fok
- 0 fő – irányszög stabilizálásának hibája: fok
- 0 fő – állásszög: ... fok
- 0 fő – csúszásszög: . fok
- 1 fő – megtett út stabilizálásának hibája: 10 %
- 1 fő – repülési magasság stabilizálásának hibája: 10 %
- 0 fő – oldalkoordináta stabilizálásának hibája: m
- 1 fő – repülési sebesség stabilizálásának hibája: 5 km/h
- 1 fő – függőleges sebesség stabilizálásának hibája: 5 km/h
- 1 fő – oldalirányú sebesség: 5 km/h
- 0 fő – egyéb repülési paraméter statikus hibája

Következtetések:

A válaszadók e kérdést túlságosan is specifikusnak tartották, mindösszesen két fő adott érdemi választ e kérdésre:

- 1) az első válaszadó relatív stabilizálási pontatlanságot adott meg, 10 % értékben. Ez az érték meglehetősen nagy, a fedélzeti szenzor műszaki paraméterei, vélelmezhetően tovább korlátozzák ezt a statikus pontatlanságot. Általános szabályozástechnikai elv, hogy a zárt

szabályozási rendszerek statikus hibáját $\pm 5\%$ -al adják meg. Igényes, minőségi szabályozásokban ez a pontatlanság $\pm 2\%$ -al adható meg. Tekintettel a megoldandó feladatok sajátosságaira, valamint a repülésbiztonság elsődleges követelményeire, e minőségi követelményeket – az egyes irányítási csatornáknak – külön meg kell vizsgálni.

2) A második válaszadó a repülés sebesség komponenseinek statikus hibáját 5 km/h értékben adta meg. Tekintettel egy hipotetikus UAV, korábban a válaszadók által megadott $v = (40 \div 100) \text{ km/h}$ repülési sebességére (amelynek maximális értéke 150 km/h) a hosszirányú sebesség esetén a válaszadó által elvárt pontosság 5 %. A másik két sebességi komponens tekintetében a megadott 5 km/h eltűzöttnek tűnik, hiszen pl. ilyen függőleges sebesség ($\approx 1,38 \text{ m/s}$) mellett a $H = 100 \text{ m}$ repülési magasságról az UAV $\approx 72,5 \text{ sec}$ alatt teljesen elveszíti a magasságát, és a földre csapódik. Megállapítható tehát, hogy a függőleges, és az oldalirányú sebességek elvárt statikus pontatlanságai újragondolást tesznek szükségessé. Természetesen, e sebességi összetevők, ideális esetben, adott manőverek (pl. útvonalrepülés, magasságstabilizálás) esetén, zérusértékűek, míg más üzemmódokon (pl. emelkedés, süllyedés, leszállás) előre megadott algoritmus szerint változnak – az értéktartó szabályozási rendszer ilyenkor értékkövető rendszerré válik.

17. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek repülése, illetve az egyes automatikus repülési üzemmódokon javasolt-e repülésbiztonsági korlátozások alkalmazása?

- 0 fő – korlátozás javasolt
- 4 fő – korlátozás nem javasolt

Következtetések:

A válaszadók nem tartották szükségesnek az egyes repülési üzemmódokon a korlátozások alkalmazását.

18. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy Ön szerint a pilóta nélküli repülőgépek repülési paraméterei milyen légi üzemeltetési korlátozással bírnak?

- 0 fő – bólintási szög maximális értéke: fok
- 0 fő – bedöntési szög maximális értéke: fok
- 0 fő – az irányszög változás maximális értéke: fok
- 0 fő – az állásszög maximális értéke: fok
- 0 fő – a csúszásszög maximális értéke: fok
- 2 fő – repülési magasság maximális értéke:
 - 1 fő – 800 m
 - 1 fő – 1500 m

0 fő – az oldalkoordináta maximális értéke: m

2 fő – a repülési sebesség maximális értéke:

1 fő – 100 km/h

1 fő – (20÷50) km/h

1 fő – a függőleges sebesség maximális értéke: 10 km/h

1 fő – az oldalirányú sebesség maximális értéke: 10 km/h

0 fő – egyéb repülési paraméter korlátozása

Következtetések:

A válaszadók a kérdést túlságosan is specifikusnak tartották, mindösszesen két fő adott értékelhető választ a kérdésre:

1) az első válaszadó $H_{\max} = 800 \text{ m}$ és $v_{\max} = 100 \text{ km/h}$ repülési paramétereket adta meg a repülési paraméterek légi üzemeltetési korlátozási értéknek. Eme értékek reálisak, repülési magasság aktuális értékét azonban a fedélzeti szenzor is korlátozhatja.

2) A második válaszadó ugyan $H_{\max} = 1500 \text{ m}$ repülési magasságot adott meg, de a repülési sebesség $v_{\max} = (20 \div 50) \text{ km/h}$ értéke meglehetősen alacsonynak tűnik – az adott UAV repülési tartománya eme értéket is nyilvánvalóan, akár nagyobb értékkel, de bekorlátozza a repülési magasságnak megfelelően.

19. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!

1 fő – kivezetés vízszintes repülési helyzetbe

5 fő – tereptárgyak átrepülése

0 fő – átstartolás

2 fő – tereptárgyak megkerülése

2 fő – kényszerleszállás

0 fő – egyéb veszélyes repülési üzemmód

Következtetések:

A kérdés megválaszolása során a válaszadók az alábbi veszélyes üzemmódok automatizálásának szükségessége mellett döntöttek:

1) kivezetés vízszintes repülési helyzetbe (a repülési pályaszög: $\Theta = \vartheta - \alpha = 0^\circ$, a repülési magasság: $H = \text{áll.}$, a repülési sebesség: $v_x = \text{áll.}$, a repülési irányszög: $\Psi = \text{áll.}$);

2) kényszerleszállás (az elérni kívánt cél egyértelmű megfogalmazása után a földfelszín megközelítéséhez szükséges pályaszakasz megtervezése, és a megközelítési algoritmus felállítása mindenképpen szükséges);

3) tereptárgyak átrepülése (veszélyes, forszírozott üzemi emelkedés, amely vízszintes, egyenes-vonalú repülési fázissal fejeződik be. Az átrepülni kívánt tereptárgyak lehetséges

körét, és azok geometriai jellemzőit pontosítani szükséges, és ehhez a manőverhez algoritmust kell kidolgozni);

4) tereptárgyak megkerülése (kitérő manőverek definiálása, és a repülési pálya megtervezése elengedhetetlenül szükséges).

20. Ön a szakterületén milyen gyakorisággal használná a pilóta nélküli repülőgépet?!

1 fő – naponta

0 fő – egy alkalommal

1 fő – több alkalommal (évente 2-3 alkalommal)

2 fő – hetente

0 fő – egy napon

1 fő – több napon

1 fő – eseménytől függően

6 fő – havonta

0 fő – egy héten

1 fő – több héten

2 fő – alkalmyszerűen

1 fő – belvízvédekezéskor

1 fő – alkalmyszerűen (nagyobb árvíz-belvíz esetén)

Következtetések:

A kérdés megválaszolásakor az UAV alkalmazásának gyakoriságára az alábbi javaslatok érkeztek:

1) a válaszadók többsége a havonta több héten keresztül, az alkalmazási feltételek (árvíz, belvíz) teljesülése esetén javasolja alkalmazni a pilóta nélküli repülőgépeket;

2) a válaszadók másik része viszont akár a napi-, vagy a heti rendszerességgel történő alkalmazás mellett tette le a voksát. Tekintettel hazánk jelenlegi klimatikus helyzetére, valamint a klímaváltozás vélelmezett negatív jelenségeire, és hazánkra gyakorolt hatásaira, megállapítani szükséges, hogy az árvizek, és a belvizek idején az UAV alkalmazások akár napi több felszállást is jelenthetnek.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS, EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A pilóta nélküli repülőgépek lehetséges alkalmazási területeit, illetve a repülőgépekkel szemben támasztott műszaki követelményeit, és képességeit – a BRAVO-csoport válaszai alapján – a 2. Táblázatban foglaltuk össze.

 MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
 A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

A BRAVO-csoport pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelményei			
Fsz.	Az elvárt képesség	A követelmény leírása, értéke	
1.	Függesztmény	Infra kamera, színes video kamera	
2.	A repülések időjárási feltételei	Minden évszak, csapadékos (esős, hóeséses) idő, szélcsendes, és közepesen erős szél, (-30 °C ÷ +60 °C) hőmérsékleti tartomány	
3.	Repülési magasság tartománya	$H = (50 \div 1000) m$	
4.	Repülési sebesség tartománya	$v = (40 \div 100) km/h, v_{max} = 150 km/h$	
5.	Hatótávolság	$L_1 = (500 \div 5000) m, L_2 = (10 \div 50) km,$ $50 km \leq L_{max} \leq 100 km$	
6.	Repülési idő	$t_{rep} = (15 \div 120) perc, t_{rep_{max}} = 120 perc$	
7.	Megfigyelt objektum, személyek sebessége	$v_1 = (1 \div 10) km/h, v_2 = (20 \div 50) km/h,$ $v_{max} \leq 50 km/h$	
8.	Repülési távolság	$L_{VFR} = (500 \div 2000) m, L_{IFR} = (1 \div 20) km,$ $L_{IFR_{max}} \geq 20 km$	
9.	Rendelkezésre állási idő	$t_{rend} = (10 \div 120) perc, t_{rend_{max}} \leq 48 óra$	
10.	Készültségi idő	$t_{készült} = (30 \div 300) perc, t_{készült_{min}} = 5 perc$	
11.	Automatizált repülési üzemmódok	Automatikus fel-, és leszállás; Térbeli szöghelyzet stabilizálása; Repülési sebesség stabilizálása; Kismagasságú repülések automatizálása; Programozott útvonalrepülés	
12.	Repülési paraméterek stabilizálásának statikus hibája	Megtett út	10 %
		Repülési magasság	10 %
		Repülési sebesség	5 km/h
		Függőleges sebesség	5 km/h
		Oldalirányú sebesség	5 km/h
13.	A légi üzemeltetés korlátozásai	1) $H_{max} = 800 m \div v_{max} = 100 km/h$ 2) $H_{max} = 1500 m \div v_{max} = (20 \div 50) km/h$	
14.	Veszélyes repülési üzemmódok automatizálása	Kivezetés vízszintes repülési helyzetbe; Kényszerleszállás; Tereptárgyak átrepülése; Tereptárgyak megkerülése	
15.	A repülés gyakorisága	Havonta, több héten keresztül; Napi-, vagy heti rendszerességgel; Szükség esetén, alkalmasszerűen.	



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A 2. Táblázat nagyban segítheti az UAV földi, és légi üzemeltetésének megbízhatóságát, és a repülésbiztonságot. A cikkben a szerzők bemutatták egy válaszadó célcsoport által szolgáltatott adatok kiértékelését, a válaszok kritikai elemzését, és elvégezték a pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények egységes rendszerbe foglalását. Az eredmények alapjául szolgálhatnak valós UAV-rendszerek előzetes-, illetve prototípus-tervezésekor.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.
- [2] <http://www.mult-kor.hu/cikk.php?article=20065> (Letöltve: 2008. március 17.)

III. RÉSZ

A CHARLIE-, ÉS A DELTA CSOPORTOK

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

BEVEZETÉS

A pilóta nélküli repülőgépek fontosságához ma már nem férhet kétség. Mindazonáltal, a megfelelő UAV-technológia kiválasztása – tekintettel a szélekkörü kínálatra – meglehetősen nehézkes. Ha a szükségesnél nagyobb képességű rendszert választanak, akkor drága lesz az üzemeltetés.

Ha a műszaki-technikai paramétereket „alul” választjuk meg, akkor képességeket veszíthetünk. Ezért fontos az alkalmazói elvárások mélybeható ismerete. E rész két válaszadói csoportot mutat be, amelyek polgári alkalmazóként szeretnék alkalmazni az UAV technológiákat.

I. MOTIVÁCIÓ, PROBLÉMAFELVETÉS

A modern világban a biztonság kérdése központi témává vált. Beszélünk személyi-, vagyon-, környezet-, közlekedés-, élelmiszerbiztonságról, a teljesség igénye nélkül megadva a sort. E fejezet az UAV technológiák lehetséges polgári alkalmazásával foglalkozik, megjegyezve a katonai alkalmazások fontosságát is. A polgári alkalmazások során a mezőgazdaság-, az erdőgazdálkodás-, az energiaipar-, a távközlési rendszerek is hatékonyan használhatják az UAV technológiát felderítési-, adatgyűjtési-, és biztonsági céllal.

Sok feladat, például adatgyűjtés árvízi-, és egyéb más természeti katasztrófáról, eleve kizárja az emberi feladatvégrehajtást. Balesetek esetén, a veszélyes áru (pl. vegyi anyagok, hadianyagok, robbanóanyagok, lőszer stb.) szállításakor bekövetkező balesetek szintén kizárják az emberi feladatvégrehajtást. Ebben az esetben kerülnek előtérbe az UAV technológiák, amelyek akár veszélyes helyeken, egyszer alkalmazott eszközként is bevethetőek.

II. ELŐZMÉNYEK, SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE

A szerző által elindított tudományos kutatási programot a [4] irodalom mutatja be. E fejezetben bemutatott eredmények mellett néhány más válaszadói csoport is kiértékelésre került [1]. A [2] és [3] irodalmak az UAV technológiák lehetséges polgári alkalmazásait mutatják be.

A lehetséges polgári alkalmazások mellett, széleskörű az elvárás a katonai szakértők szerint is, akik az [5] és a [6] cikkekben bemutatott eredmények szerint szeretnék az UAV alkalmazások kiterjesztését. A [7] forrás a sztochasztikus légköri turbulencia matematikai modellezésével foglalkozik, amelyek jól használhatóak az automatikus repülésszabályozó rendszerek előzetes számítógépes tervezése során.

III. UAV RENDSZEREK MŰSZAKI-TECHNIKAI PARAMÉTEREI POLGÁRI ALKALMAZÁSOK ESETÉN

3.1. A „CHARLIE”-, ÉS A “DELTA” CSOPORT VÁLASZAINAK ELŐZETES STATISZTIKAI KIÉRTÉKELÉSE

A *Charlie*-csoport tagjai a határőrizetben dolgozó szakemberek közül kerültek ki, akik feladata a „zöld” határ ellenőrzése az illegális migráció, és illegális kereskedelem ellen. A *Delta*-csoport tagjai a katasztrófavédelemben dolgozó szakemberek közül kerültek ki. A két válaszadói csoport válaszainak előzetes statisztikai kiértékelése az 1., és a 2. Táblázatokban látható.

A “CHARLIE”-csoport statisztikai adatai

1. Táblázat

Postázott kérdőívek száma	Kézbcsített kérdőívek száma	Nem kézbcsített kérdőívek száma	Megválaszolt felkérések száma	Kitöltött kérdőívek száma
11 (100 %)	11 (100 %)	0 (0 %)	6 (≈55 %)	5 (≈83 % : ≈45 %)

A “DELTA”-csoport statisztikai adatai

2. Táblázat

Postázott kérdőívek száma	Kézbcsített kérdőívek száma	Nem kézbcsített kérdőívek száma	Megválaszolt felkérések száma	Kitöltött kérdőívek száma
20 (100 %)	20 (100 %)	0 (0 %)	13 (65 %)	12 (≈92 % : 60 %)

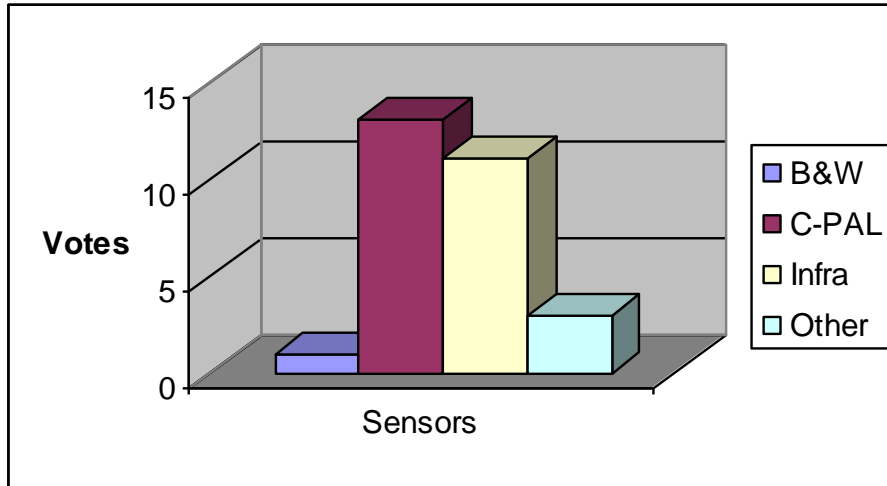
A fenti két táblázat alapján megállapítható, hogy úgy a Charlie-, mint a Delta válaszadói csoportok fontosnak vélték a válaszadást, és értékelhető módon járultak hozzá a kutatás sikeréhez.

3.2. UAV-RENDSZEREK POLGÁRI ALKALMAZÁSÁNAK KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE – ALKALMAZÓI ELVÁRÁSOK MEGHATÁROZÁSA

A határőrizeti szervek, és a katasztrófavédelmi szakemberek a tudományos kutatás során az alábbi alkalmazói elvárásokat fogalmazták meg:

  <p>MAGYARORSZÁG MEGÚJUL</p> <p>A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.</p>	<p>TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetség gondozásban (KOVÁSZ)</p>
--	---

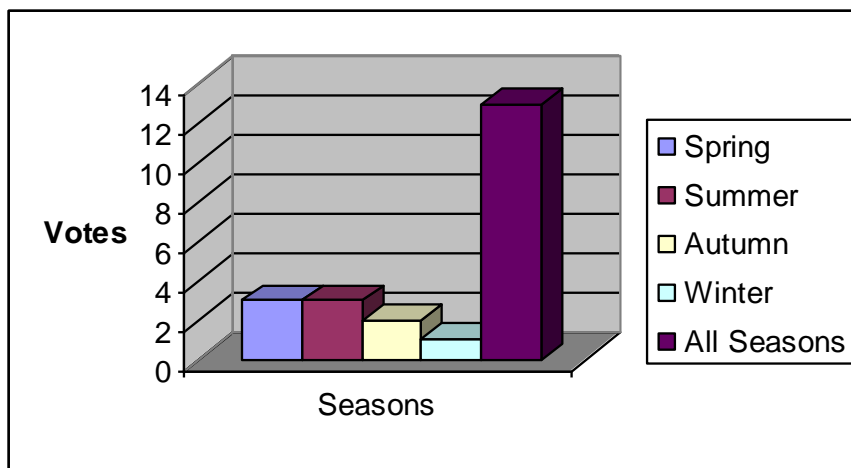
1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!



Következtetések:

A szakemberek többsége színes video jel, illetve az infra kamera jelet tartja elsődlegesen fontos információnak, és a válaszadók kis hányada fogalmazott meg igényt más jellegű (hőkép, NBC-jelek stb.) információ iránt.

2. Adja meg, hogy az Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



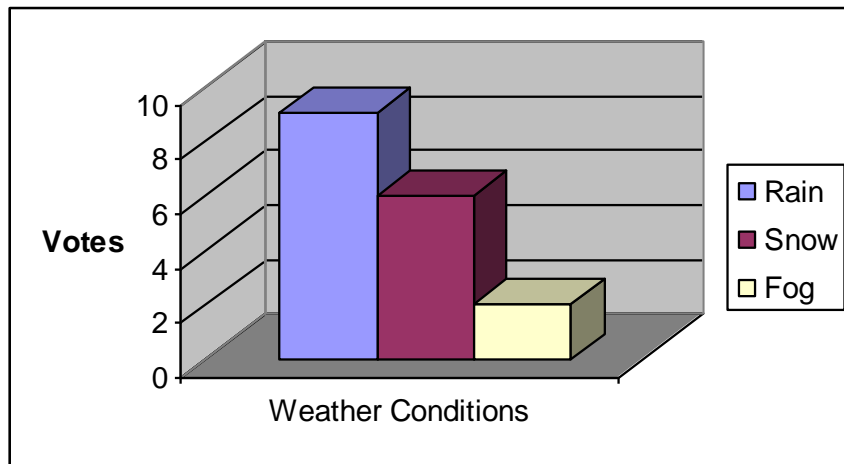
A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Következtetések:

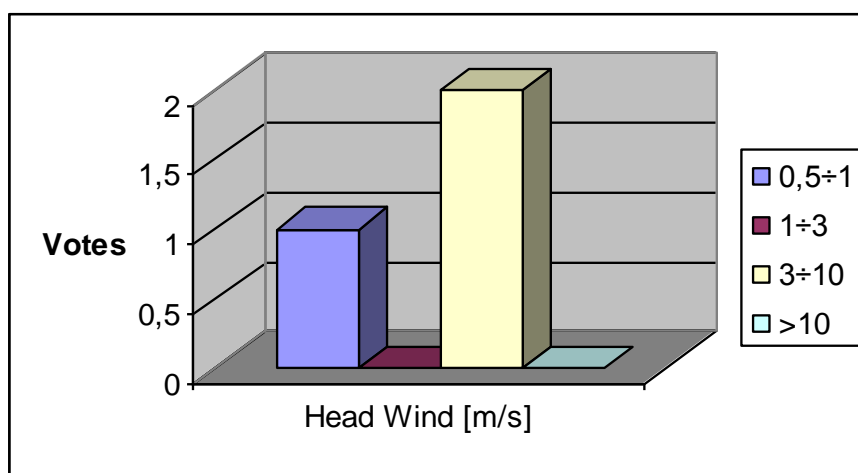
A válaszadók többsége a minden idejű bevetése képességet részesíti előnyben, de főleg a migrációs jelenségek kezelése miatt fontos a tavaszi-, illetve a nyári UAV alkalmazások.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



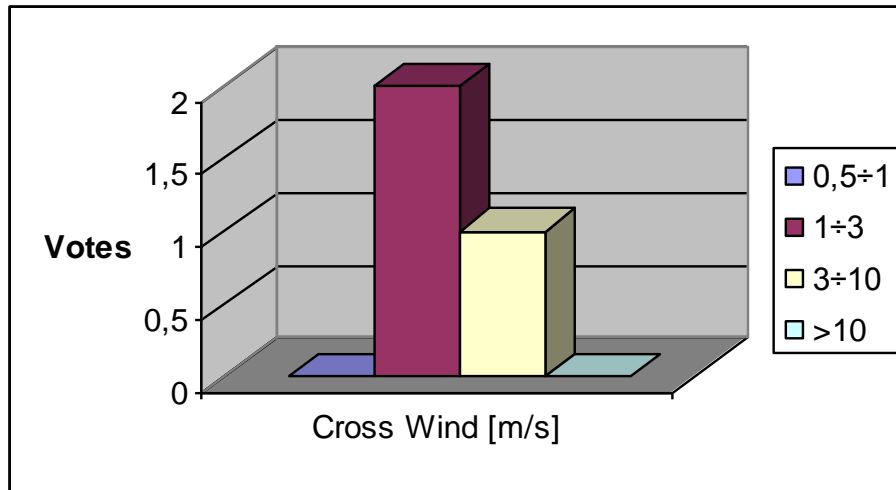
Következtetések:

A szakértők extrém (eső, hó, köd) időjárási körülmények között is szükségesnek tartják az UAV repüléseket. A szigorú követelmények kiemelt fontosságúak a légi járművek sárkányszerkezetének, a propulziós rendszerének, és a jégtelenítő rendszerének koncepcionális-, és előzetes tervezése során.



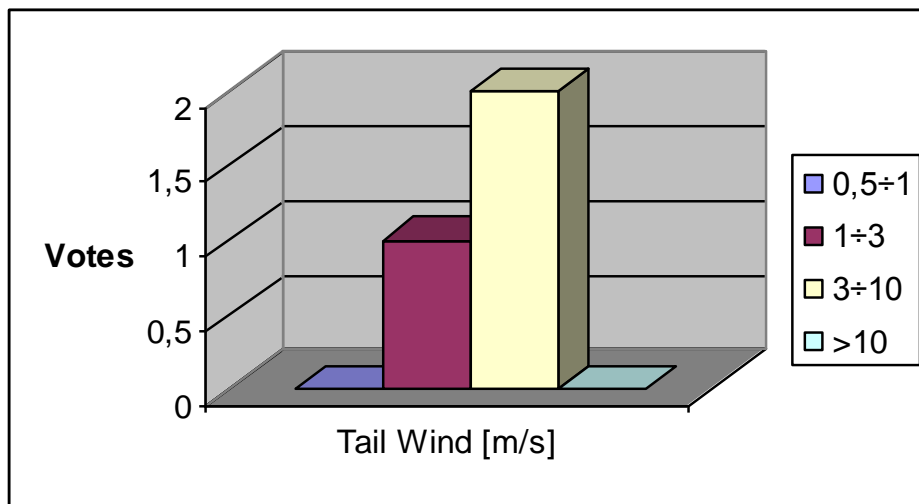
Következtetések:

A válaszadók többsége akár erős szélben is szükségesnek látja az UAV repüléseket. Az ellenszél sebességének maximális értéke $u_H \leq 10 \text{ m/s}$, ami a [7] irodalom szerint „erős vihar” időjárási feltételnek felel meg.



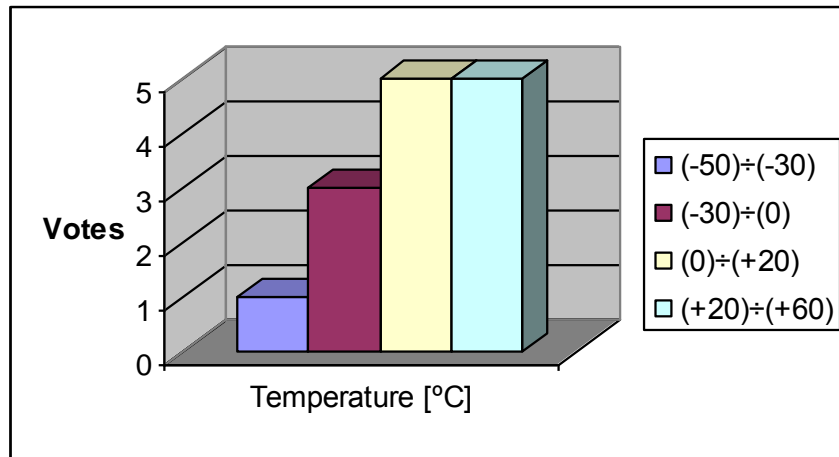
Következtetések:

Az oldalszél nagysága szintén korlátozhatja az UAV repüléseket. A válaszadók többsége a $v = (1 \div 3) \text{ m/s}$ sebességű oldalszél mellett még szükségesnek tartja az UAV repüléseket. Egy válaszadó extrém oldalszél mellett is szükségesnek látja az UAV repülések végrehajtását.



Következtetések:

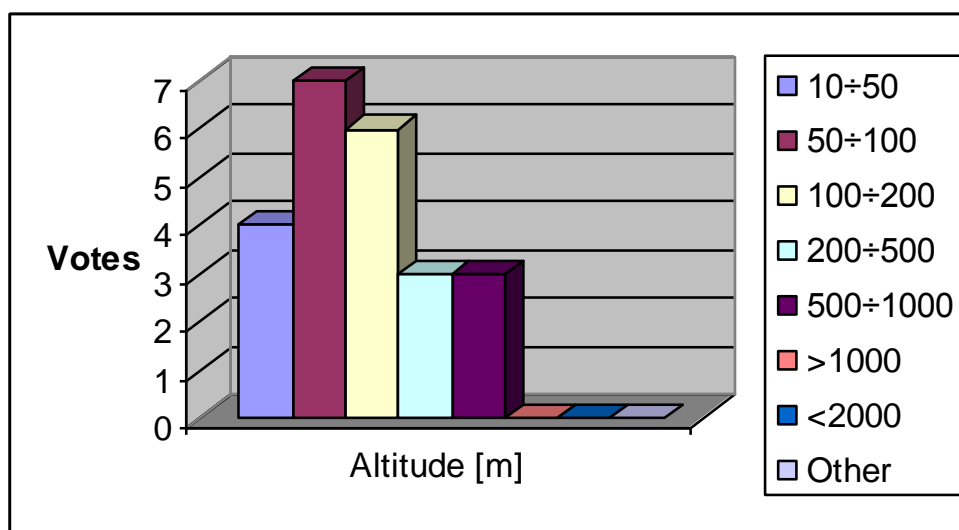
A szakértő válaszadók hátszélben is szükségesnek látják az UAV repülés végrehajtásának képességét. A válaszok alapján a hátszél maximális értéke 10 m/s.



Következtetések:

A szakértők robusztus környezeti hőmérsékleti tartományban is szükségesnek látják az UAV bevetéseket. A szakértők által megadott legalacsonyabb környezeti hőmérsékleti tartomány $T = ((-30) \div +60) ^\circ C$.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL

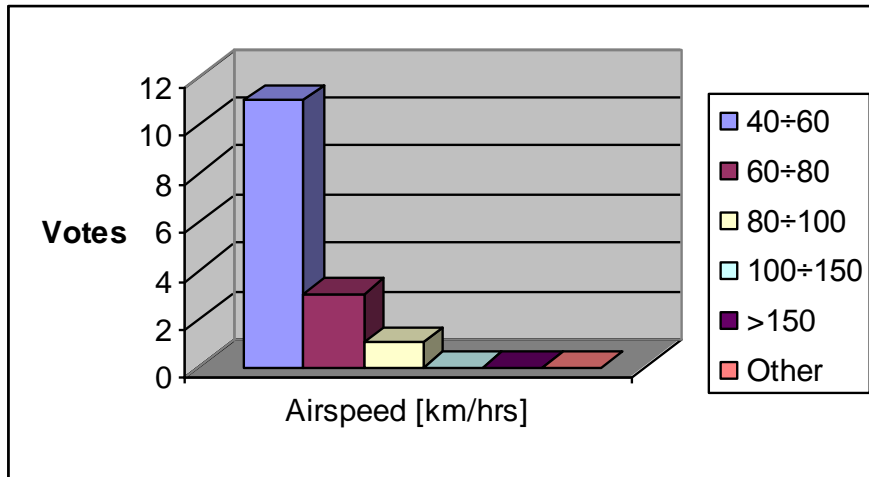


A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Következtetések:

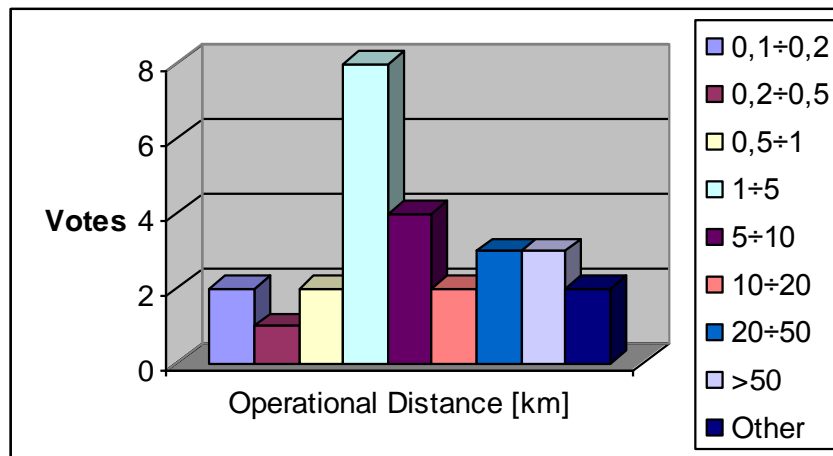
A válaszadók által preferált repülési magasság kisebb, mint 200 m. Néhány válaszadó akár az 1 km nagyságrendű repülési magasságot tartja szükségesnek.



Következtetések:

A szakértői válaszadók véleménye alapján megállapítható, hogy az UAV repülések kívánt repülési sebessége a $v = (40 \div 100) \text{ km/h}$ sebességi tartományba esik.

5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

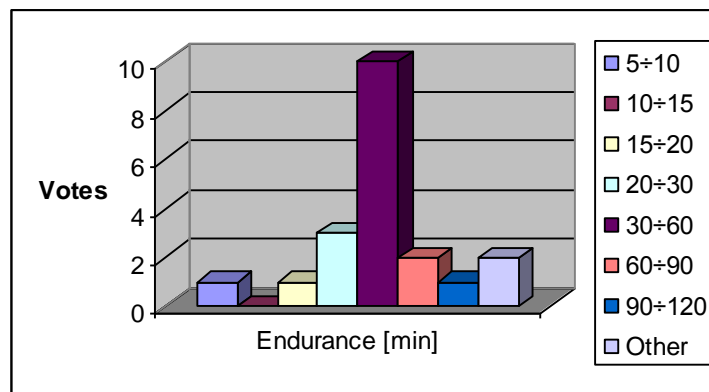


Következtetések:

	<p>TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)</p>

A szakértők többsége a repülési hatótávolság értékére a $L = (1 \div 50) \text{ km}$ távolságot adják meg. A hatótávolság maximális értéke $L_{\max} \geq 50 \text{ km}$. Könnyű belátni, hogy ilyen értékű hatótávolságok esetén a repülés automatizálása elemegedhetetlenül szükséges, hiszen az az ember számára a vizuális látóhatáron túl valósul meg.

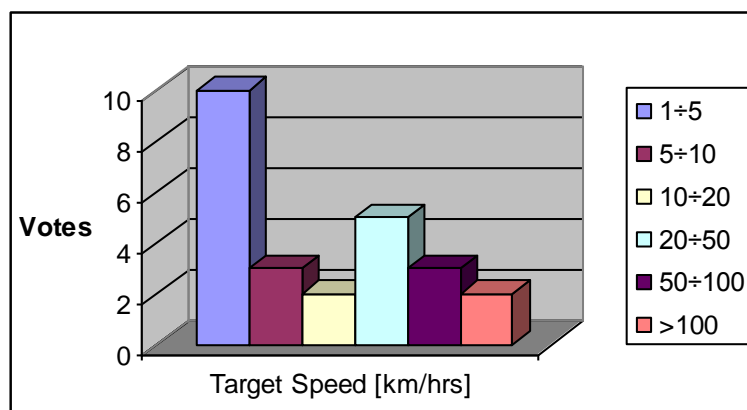
6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!



Következtetések:

A szakértői válaszok többsége a $t = (30 \div 60) \text{ min}$ repülési idő tartományba esik. Néhány válaszadó akár kétórás maximális repülési idővel is számol az UAV repülések során. A repülési idő maximális értéke nagyban befolyásolja a propulziós rendszer kiválasztását.

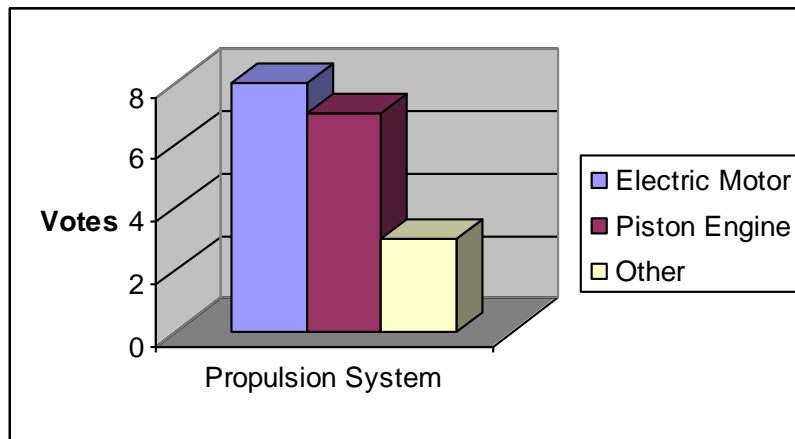
7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!



Következtetések:

A válaszadó szakértők többsége nagyon alacsony sebességgel mozgó objektumok esetén látja szükségesnek az UAV repüléseket. A cél mozgásának sebessége a $v = (1 \div 5) \text{ km/h}$ sebességi tartományba esik. Magától értetődik, hogy az UAV helikopter-, vagy multirotoros szerkezet kell legyen.

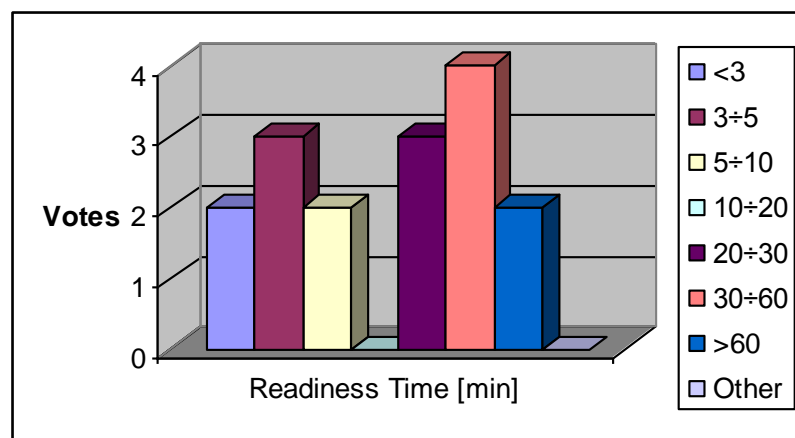
8. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?



Következtetések:

Tekintettel a repülési tartomány magassági-sebességi paramétereire, valamint a repülési időre, és a hatótávolságra, a válaszadó szakértők által leginkább preferált a villamos motoros, és a belsőégésű motoros légi járművek alkalmazása.

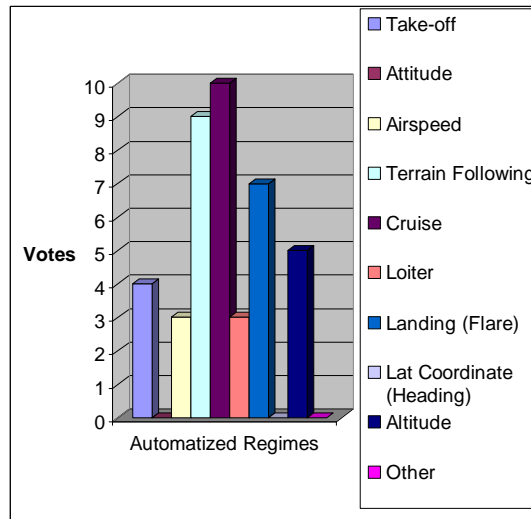
9. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készütségi idő mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?



Következtetések:

A válaszadó szakértői vélemények között két szignifikáns található: az egyik $t_{ready} = (3 \div 10)$ min , a másik $t_{ready} = (20 \div 60)$ min készenléti időt feltételez.

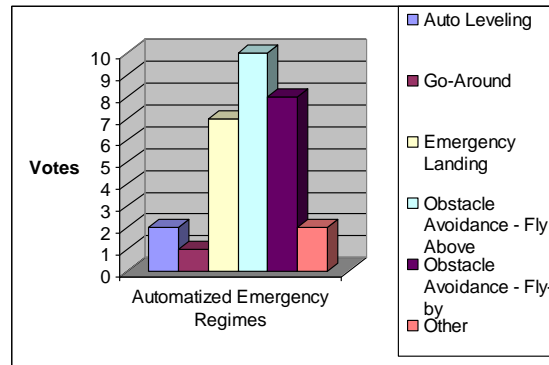
10. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!



Következtetések:

A szakértői válaszok döntő többsége alapján automatizálni szükséges a felszállást, a leszállást, a terepkövetést, az útvonalrepülést, és a repülési magasságot. Ezek a kívánalmak – gyakorlatilag – megegyeznek az ember által vezetett légi járművekkel szemben támasztott követelményeknek. Nem nehéz belátni, hogy e követelmények meglehetősen magasak szintűek.

11. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!



Következtetések:

A válaszadó szakértők többsége a kényszerleszállás, és az összeütközés elkerülésének automatizálása mellett szavazott.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

A szerző bemutatta, hogy a határőrizeti szervek, illetve a katasztrófavédelem szakemberei hogyan vélekedtek az esetleges UAV alkalmazásokról. A kapott eredmények az egyes válaszadói csoportokra reprezentatívak, az eredmények jól használhatóak UAV rendszerek előzetes, koncepcionális tervezése során.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.
- [2] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2008.
- [3] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. „70 éves a légiere” tudományos konferencia CD-ROM kiadványa, Repüléstudományi Közlemények, Különszám, 2008. április 11.
- [4] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: A new initiative – a new scientific research program „Computer aided design and analysis of the vehicle systems”, CD-ROM

Proceedings of the Vth International Symposium on Defense Technology, HU ISSN 1416-1443, 21-22 April 2008, Budapest, Hungary.

[5] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems Used for Military Applications, XVI. Magyar Repüléstudományi Napok CD-ROM kiadványa, ISBN 978-963-420-857-0, BME, 2008. november 13-14.

[6] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Egy felmérés margójára – néhány gondolat a pilóta nélküli repülőgépek polgári és katonai alkalmazásáról, Szolnoki Tudományos Közlemények, HU ISSN 2060-3002, 2008, Szolnok, Hungary.

[7] MIL-STD-1797A, Notice 3, *Flying Qualities of Piloted Aircraft*, Department of Defense, Interface Standard, 2004.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

IV. RÉSZ

A MILES-CSOPORT

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

I. BEVEZETÉS, PROBLÉMAFELVETÉS, AKTUALITÁS.

A pilóta nélküli repülőgépek úgy katonai, mint a polgári alkalmazási területeken kiválóan alkalmazhatóak információgyűjtési célból. Ismeretes, hogy katonai-hadszíntéri alkalmazások során különösen veszélyes helyzetekben is alkalmazható ez a technológia. A polgári alkalmazások leggyakoribb területei a katasztrófavédelmi-, árvízvédelmi-, biztonsági-, mezőgazdasági-, ipari-, és a közlekedési alkalmazások.

A műveleti területi katonai alkalmazások egyik fontos területe a bevetési csoportok támogatása a megfelelő felderítési információval. A katonai vezető ebben a helyzetben különféle döntéseket hozhat, amelyek: „Menet”, „Lassú menet”, és az „Állj” parancsok lehetnek. A pilóta nélküli repülőgépek a pontos hadszíntéri felderítési adatokkal nagymértékben támogatják ezt a döntéshozatali tevékenységet.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A pilóta nélküli repülőgépek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) lehetséges alkalmazóinak, vagyis a „vásárlói kör” szakmai véleményének felmérésére 2007. nyarán került sor. A felméréssel kapcsolatos előzetes, kezdeti eredményeit a szerző tudományos konferenciákon tette közzé [1]. A felmérés UAV polgári alkalmazásokkal foglalkozó eredményeit a szerző [2, 3] publikálta. A szerző a témával foglalkozó szakmai műhelyt alapított, amely tevékenységének egyik része a légi robot rendszerekkel foglalkozik [4]. A pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott polgári alkalmazások szakmai követelményeit a [5] taglalja, míg a katonai alkalmazásokkal a [6] foglalkozik.

III. A „MILES”-CSOPORT FONTOSABB JELLEMZŐI

3.1. A MILES-CSOPORT KÉRDŐÍVEINEK ELŐZETES ÉRTÉKELÉSE

A MILES-csoport 79 elemű halmaz, amely a Szerző által felkért katonai szakemberekből áll. A felkért szakértők a Magyar Honvédség, és annak szervezeti, valamint a Honvédelmi Minisztérium, és annak háttérintézményeiből kerültek ki. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait az 1. táblázat foglalja össze.

A MILES-csoport statisztikai adatai

1. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
79	100	79	100	0	0	30	≈38	28	≈93



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Az 1. táblázat alapján a MILES-csoport adatszolgáltató tevékenységéről elmondható, hogy:

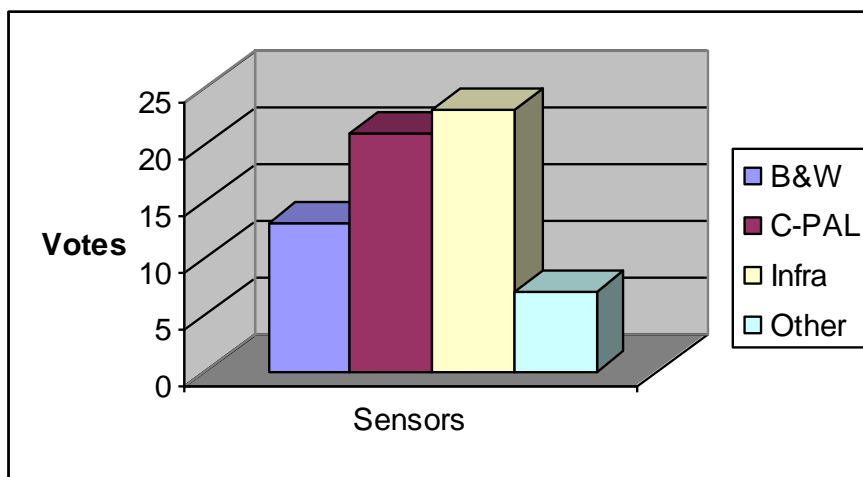
- ☺ a postázott kérdőívek mind kézbesítésre kerültek (100 %).
- ☺ a kézbesített 79 felkérésre 30 válasz (38 %) érkezett.
- ☺ a 30 visszaküldött és kitöltött kérdőívből 28 (a válaszolók 93 %-a)

A MILES-csoport által szolgáltatott adatok tehát kiértékelhetőek. További vizsgálat tárgyát képezheti, hogy miért alacsony a megválaszolt felkérések száma. Talán szerepet játszhatott benne, hogy a kérdőívek postázására, és a felkérések kézbesítésére 2007. nyarán került sor, és a nyári szabadságolás ideje rányomta a bélyegét a válaszadók aktivitására.

3.2. A MILES–CSOPORT KÉRDŐÍVEINEK SZAKMAI ÉRTÉKELÉSE, KÖVETKEZTETÉSEK

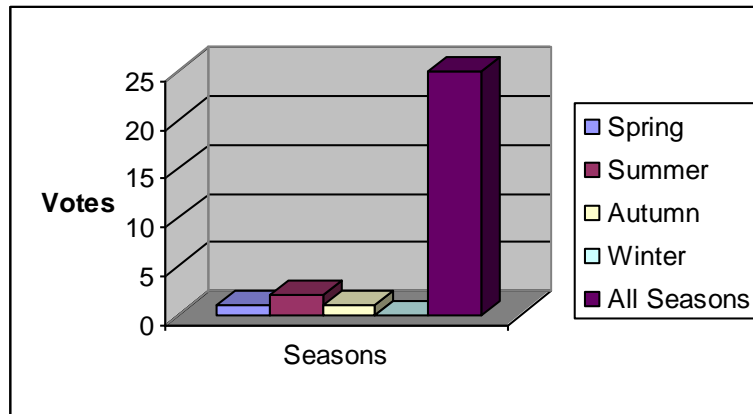
A továbbiakban a 28 válaszadót, mint önállóan véleményt formáló szakmai véleményt vesszük figyelembe. Tekintsük át az egyes kérdésekre adott válaszokat, és értékeljük azokat. A kiküldött kérdőívek releváns kérdései, és az azokra adott válaszok az alábbiak voltak:

1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!



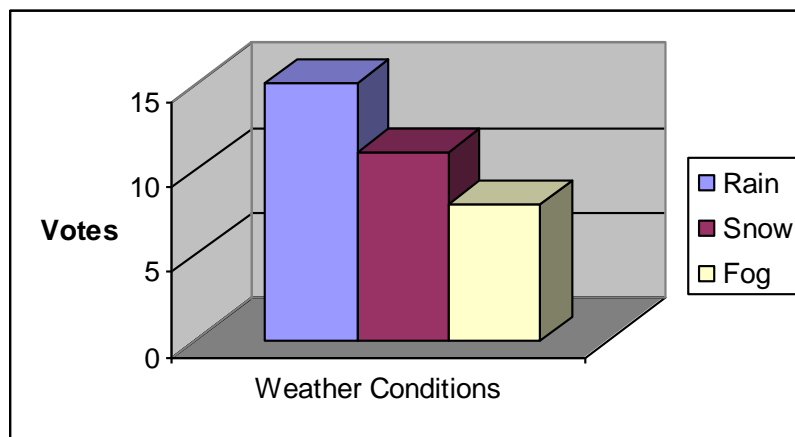
Következtetések: a kérdésre adott válaszokból egyértelműen kiderül, hogy a válaszadók szignifikáns többsége a színes video jel, valamint az infra kamera jelre tart igényt. Nem elhanyagolható azonban a hagyományos kamera jel sem, valamint két fő más jelet (hőkép, ABV) szeretne kapni.

2. Adja meg, hogy az Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

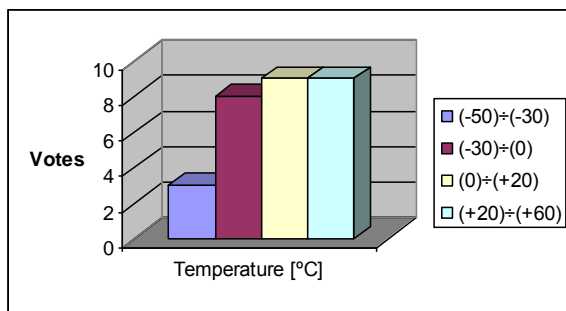
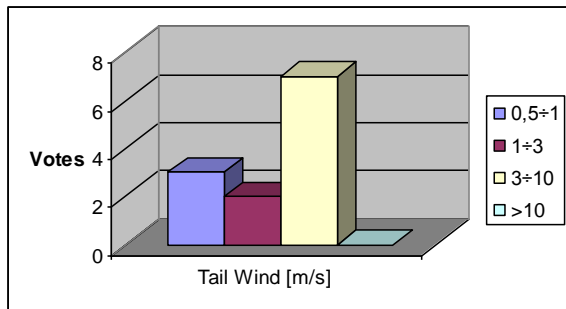
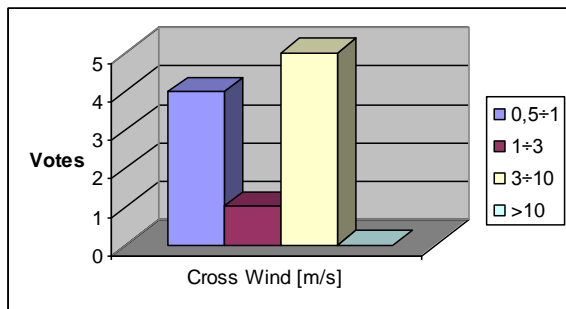
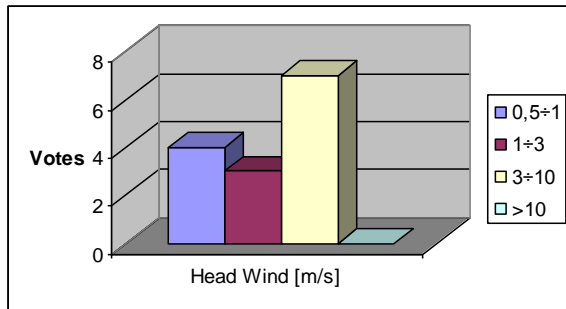


Következtetések: a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV esetleges alkalmazásai nem korlátozódtak évszakok szerint – az UAV és fedélzeti rendszerei képesnek kell lennie minden évszakban a repülésre.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



Következtetések: a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV alkalmazások előfordulhatnak esős, illetve havas időben is. Számottevő válaszadó jelölte meg a ködöt is, mint lehetséges csapadékformát, így főleg alacsony környezeti hőmérsékletek esetén fennáll a jegesedés veszélye.

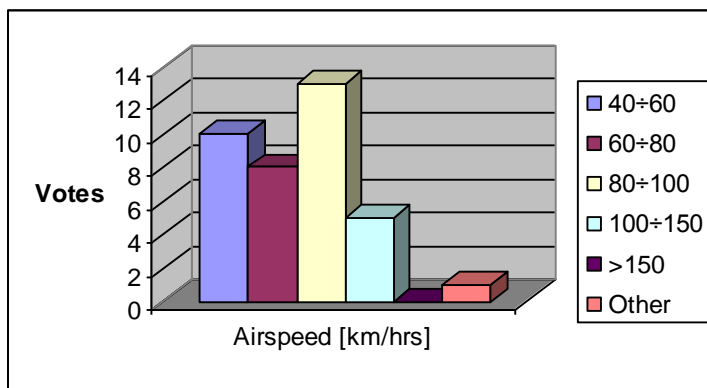
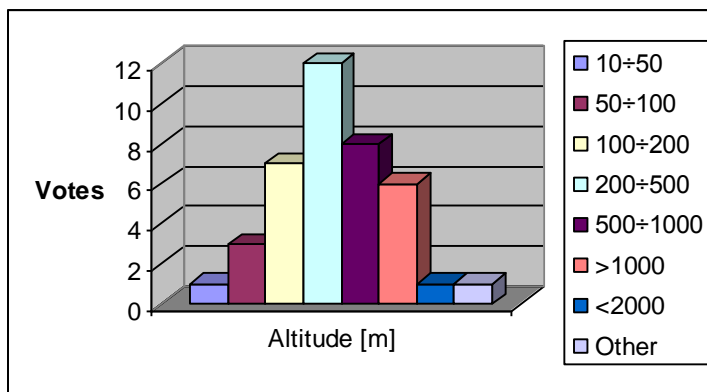


Következtetések:

- 1) A válaszadók jelentős része ellenszélben is szükségesnek tartja az UAV-repülést. Az ellenszél maximális értéknek $u_H \leq 10 \text{ m/s}$, ami számottevő értéknek mondható, és a vonatkozó szabványok szerint ez az érték „viharos szél”-nek felel meg.
- 2) A válaszadók döntő többsége az UAV-repülés során megengedettnek tekinti a nagy értékű oldalszelet is. Az oldalszél maximális értéke $v \leq 10 \text{ m/s}$. Ez az elvárás komoly minőségi-, és repülésbiztonsági követelményeket állít az UAV szöghelyzet-stabilizáló rendszereivel szemben.
- 3) A válaszadók jelentős része erős hátszélben is szükségesnek tartja a repülést. A hátszél maximális értéke $u_T \leq 10 \text{ m/s}$. A jelentős hátszélben történő repülés hatékony a repülés során felhasznált energia minimalása során, minden esetre, más elvárások biztosítják, hogy a repülési sebesség állandó legyen.
- 4) A válaszadók többsége a $T = ((-30) \div +60) \text{ } ^\circ\text{C}$ környezeti hőmérsékleti tartományban látja szükségesnek az UAV-repülést. E kérdésre azonban a még alacsonyabb hőmérsékleti tartományt is megjelölték, bár e vélemény nem szignifikáns.

Összességében tehát megállapítható, hogy a „vásárlók” (alkalmazók) az UAV-kat akár extrém klimatikus viszonyok között, nagyon alacsony hőmérsékleten (pl. magas hegyek között, télen), és nagyon magas hőmérsékleten (sivatagos területen, nyáron) is szeretnék használni. A hagyományos repülőgépek repülési-, irányítási-, és kormányzási követelményeivel, a repülés klimatikus viszonyainak leírásával, a légköri turbulencia matematikai modellezésével a [7] szabvány foglalkozik részletesen.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



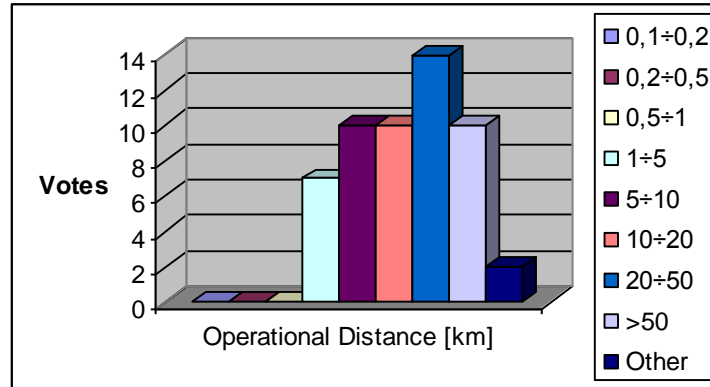
Következtetések

1) Az UAV-k elvárt tipikus repülési magassága – a válaszadók jelentős része szerint – a $H = (50 \div 1000) m$ repülési magassági tartományban helyezkedik el. Mindazonáltal, néhány szakember a $H \geq 1000 m$ repülési magasságot, és ettől nagyobb értéket is megjelölt.

2) Az UAV-k elvárt repülési sebessége a $v = (40 \div 150) km/h$ tartományba esik.

3) Említsük meg, hogy a repülési tartomány határait az UAV hajtóműve, és a fedélzeten rendelkezésre álló energiamennyiség alapvetően határozza meg.

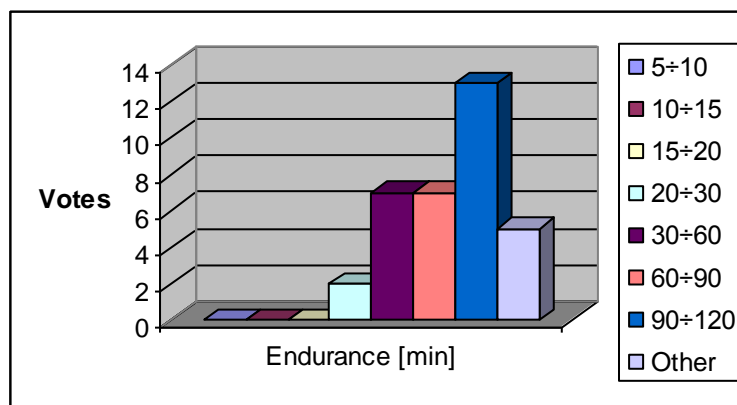
5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



Következtetések:

- 1) Az UAV-k elvárt repülési hatótávolsága, a válaszadók egy jelentős része számára a $L = (1 \div 50) km$ tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy a repülés, jó időjárási viszonyok között is a vizuális látóhatáron túlra történik.
- 2) A válaszadók másik nagy csoportja az $L_{max} \geq 50 km$, valamint attól nagyobb hatótávolságot jelölte meg elvárt követelményként. Tekintettel a felmérés sajátosságaira, ami kisméretű, korlátozott manőverező képességű UAVk alkalmazását jelenti, elmondhatjuk tehát, hogy az elvárt hatótávolság maximális értéke: $L_{max} \geq 50 km$.

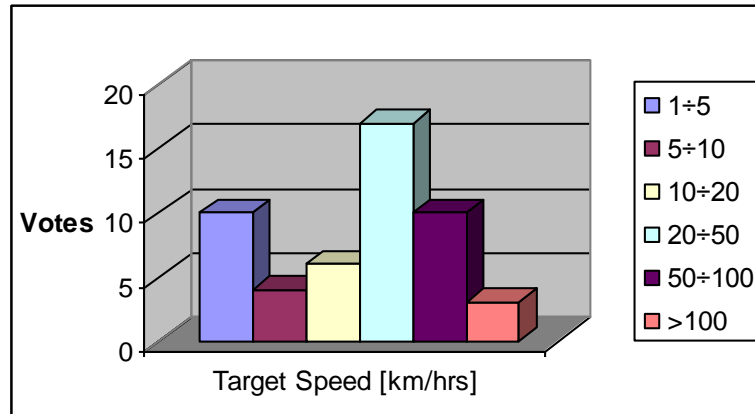
6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!



Következtetések:

A válaszadók által megadott értékek alapján elmondható, hogy a repülési idő $t_{rep} = (20 \div 120) perc$. Néhány válaszadó ettől nagyobb repülési időt is megjelölt, de tekintettel a vizsgálandó UAV alkalmazásokra, a repülési idő maximális értéke tehát 2 óra.

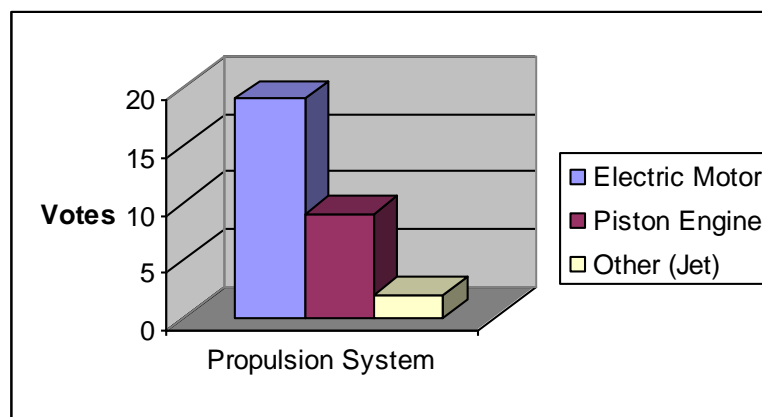
7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!



Következtetések:

- 1) A megfigyelés tárgyát képező tárgyak, objektumok, személyek, a válaszadók jelentős többsége esetében $v = (20 \div 50) \text{ km/h}$ sebességgel mozognak. Számottevő a kis értékű sebességet megjelölők aránya, ami akár élőlények mozgásának megfigyelését is jelentheti.
- 2) A válaszadók másik csoportja megjelölt egy meglehetősen nagy sebességet is, amely a $v = (50 \div 100) \text{ km/h}$ tartományba esik, sőt, néhányan még ettől is nagyobb sebességet jelöltek meg. Tekintettel azonban a meteorológiai/klimatikus viszonyokra, elmondhatjuk tehát, hogy a megfigyelni kívánt objektumok maximális sebessége $v_{\max} \leq 100 \text{ km/h}$.

8. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?

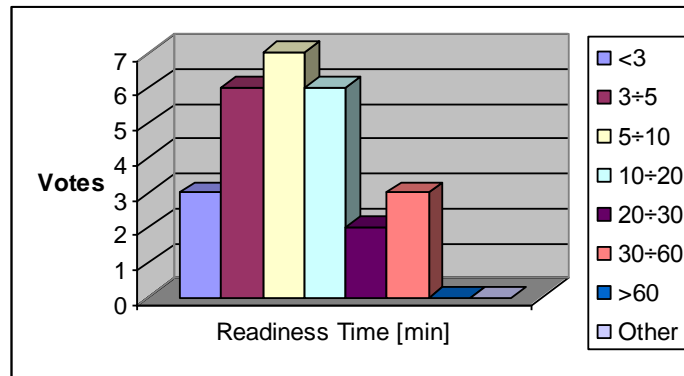


Következtetések:

A válaszadók egyértelműen a villamos motort jelölték meg a repüléshez szükséges energia forrásaként. A belsőégésű, dugattyús motort is alkalmasnak találták, és néhányan más típusú hajtást (sugárhajtómű, rakétahajtómű) is megjelöltek.

Tekintettel a repülő motorok által keltett zajra, magától értetődik, hogy a csendes villamos motorok alkalmazása kifejezetten előnyös, főleg műveleti területeken, vagy a határőrizeti feladatok megoldása során.

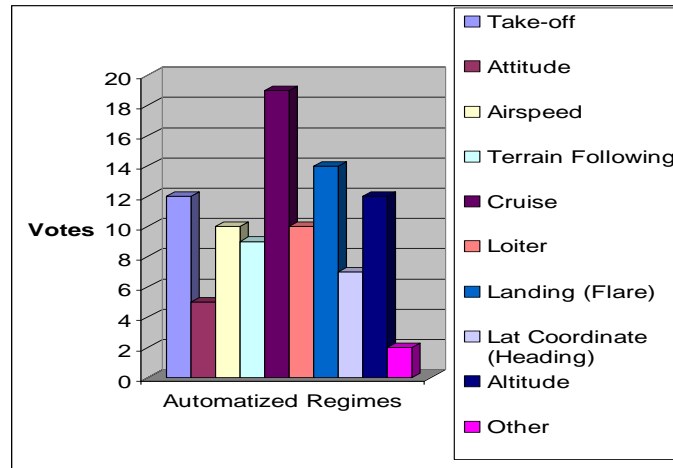
9. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készülségi idő mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?



Következtetések:

A válaszadók többsége által megadott készülségi idő értéke $t_{készült} = (3 \div 20) \text{ perc}$. Megemlíteni szükséges azonban, hogy néhány válaszadó a $(20 \div 60)$ perces készülségi időt is megadott, és néhányan még három perc alatti készenléti időt is megadtak. Reális célkitűzés, hogy a készülségi idő $t_{készült} = (3 \div 20) \text{ perc}$ legyen.

10. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!

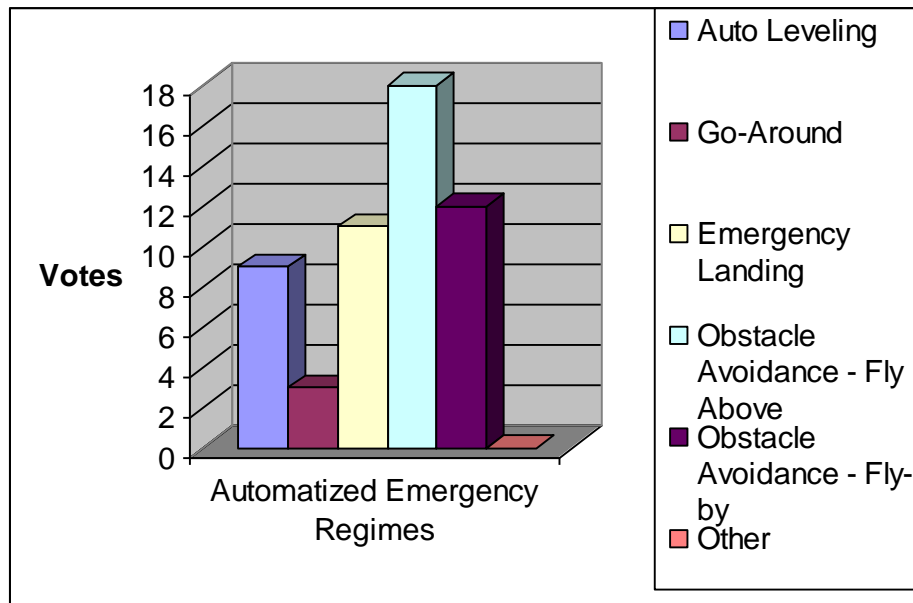


Következtetések:

A válaszadók az alábbi automatizálási feladatok megoldását tartották szükségesnek:

- 1) automatikus fel-, és leszállás;
- 2) térbeli szöghelyzet (dőlés, bólintás, irány) stabilizálás;
- 3) repülési sebesség stabilizálása;
- 4) kismagasságú repülések automatizálása (repülési magasság stabilizálása, emelkedés, süllyedés, egyéb más, magasság változtatással járó manőverek);
- 5) programozott útvonalrepülések (a felszállás és a leszállás helye között).
- 6) Más üzemmódok: statikus objektumok megfigyelése, adatvesztés esetén „hazatérés” automatikus végrehajtása.

11. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!



Következtetések:

A kérdés megválaszolása során a válaszadók az alábbi veszélyes üzemmódok automatizálásának szükségessége mellett döntöttek:

- 1) kivezetés vízszintes repülési helyzetbe (a repülési pályaszög: $\Theta = \vartheta - \alpha = 0^\circ$, a repülési magasság: $H = áll.$, a repülési sebesség: $v_x = áll.$, a repülési irányszög: $\Psi = áll.$);
- 2) kényszerleszállás (az elérni kívánt cél egyértelmű megfogalmazása után a földfelszín megközelítéséhez szükséges pályaszakasz megtervezése, és a megközelítési algoritmus felállítása)
- 3) átstartolás
- 4) tereptárgyak átrepülése (veszélyes, forszírozott üzemű emelkedés), amely vízszintes, egyenes-vonalú repülési fázissal fejeződik be.
- 5) tereptárgyak megkerülése (kitérő manőverek definiálása, és a repülési pálya megtervezése elengedhetetlenül szükséges).
- 6) más repülési üzemmódok (pl. „hazatérés” a repülési feladat bármelyik fázisából, statikus objektumok megfigyelése).

V. ÖSSZEFOGLALÁS, EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A pilóta nélküli repülőgépek lehetséges alkalmazási területeit, illetve a repülőgépekkel szemben támasztott műszaki követelményeit, és képességeit – a MILES-csoport válaszai alapján – a 2. Táblázatban foglaltuk össze.

VI. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.
- [2] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2008.
- [3] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. „70 éves a légiereő” tudományos konferencia CD-ROM kiadványa, Repüléstudományi Közlemények, Különszám, 2008. április 11.
- [4] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: *A new initiative – a new scientific research program „computer aided design and analysis of the vehicle systems”*, Proceedings of the Vth International Symposium on Defense Technology, 21-22 April 2008, Budapest, Hungary (in print).
- [5] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems Used for Military Applications*, XVI. Magyar Repüléstudományi Napok, BME, 2008. november 13-14, (megjelenés alatt).
- [6] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems for Non-Military Applications*, Proceedings of the 11th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, VSDIA 2008, BUTE, 10-12 November 2008 (to be appeared).
- [7] MIL-STD-1797A, *Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft*, Department of Defense, Interface Standard, 2004.

V. RÉSZ

A TŰZOLTÓK-CSOPORT

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

BEVEZETÉS

A mai modern UAS⁶ rendszerek komplex rendszerek összessége, amelyek úgy a polgári, mint katonai alkalmazások során – sok esetben akár – D3 (Dirty – Dull - Dangerous) feladatokat látnak el. Új kihívások jelentkeznek, amikor zárt térben, akár zárt, vagy nyitott épületeken belül kell felderítési feladatot ellátni, és információt gyűjteni. Sok esetben a felderítés során néhány alapvető információt szeretnénk szerezni az eseményekről, célokról. A szerző célja bemutatni, és összehasonlítani két rendelkezésre álló technológiát, a forgó-, és a merevszárnyú UAV-technológiákat. A szerző az összehasonlító elemzést kutatása során kapott szakértői vélemények eredményeivel támasztja alá. A kutatás aktualitását nagyban alátámasztja a hazai-, és a nemzetközi árvízhelyzet, a klímaváltozást jellemző esőzések, földcsuszamlások, sárlavinák ellenőrzése, és monitoring-vizsgálatának szükségessége.

I. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A pilóta nélküli repülőgépek polgári-, és katonai alkalmazásával kapcsolatban a szerző által készített országos, reprezentatív felmérés előzetes eredményeit hazai-, és külföldi konferenciákon, szimpóziumokon tette közzé. E fejezetben a *Tűzoltók* válaszadói csoport által szolgáltatott szakmai vélemények kiértékelése történik meg [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

II. A „TŰZOLTÓK”-CSOPORT FONTOSABB JELLEMZŐI

A TŰZOLTÓK-csoport 36 elemű halmaz, amely a szerző által felkért tűzoltó szakemberekből állt. A szakértők a megyei-, a városi-, és egyéb (pl. Paks, repülőterek stb.) tűzoltó szervezeteiről kerültek felkérésre. A kiküldött kérdőívek alapján a csoport tevékenységének statisztikai adatait az 1. táblázat foglalja össze:

A TŰZOLTÓK-csoport statisztikai adatai

1. táblázat

Postázott kérdőívek száma		Kézbesített kérdőívek száma		Nem kézbesített kérdőívek száma		Megválaszolt felkérések száma		Kitöltött kérdőívek száma	
darab	%	darab	%	darab	%	darab	%	darab	%
36	100	36	100	0	0	21	≈58	20	≈95

Az 1. táblázat alapján a Tűzoltók-csoport adatszolgáltató tevékenységéről elmondható, hogy:

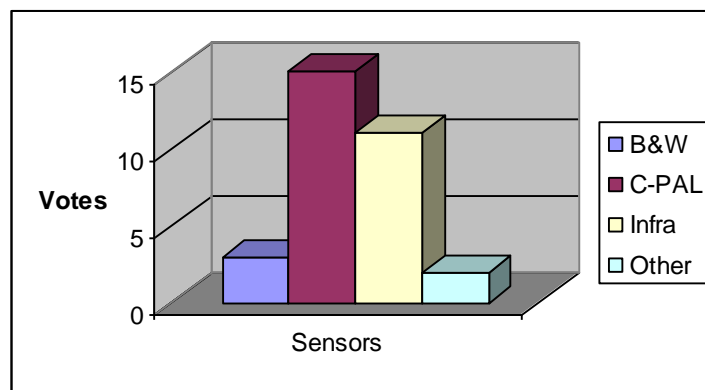
1. a postázott kérdőívek mind kézbesítésre kerültek (100 %).
2. a kézbesített 36 felkérésre 21 válasz (58 %) érkezett.

⁶ UAS – Unmanned Aerial Systems

3. a 21 visszaküldött és kitöltött kérdőívből 20 (a válaszolók 95 %-a) fő adott érdemi, értékelhető választ a feltett szakmai kérdésekre.

Az 1. táblázat összefoglaló adatai alapján tehát megállapítható, hogy a TŰZOLTÓK-csoport által szolgáltatott adatok tehát kiértékelhetőek, véleményük szignifikáns e területen. A továbbiakban a 20 válaszadót, mint önállóan véleményt formáló szakmai véleményt vesszük figyelembe. Tekintsük át az egyes kérdésekre adott válaszokat, és értékeljük azokat.

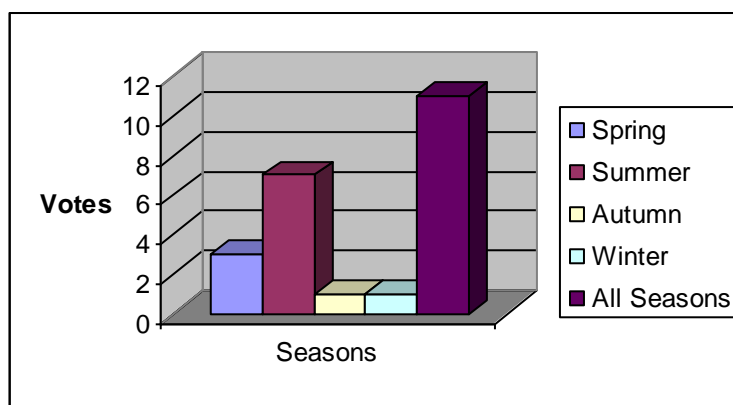
1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!



Következtetések:

a kérdésre adott válaszokból kiderül, hogy a válaszadók szignifikáns többsége a színes videojel, valamint az infrakamera jelre tart igényt. Az érzékelők COTS-technológia szerint hozzáférhetőek.

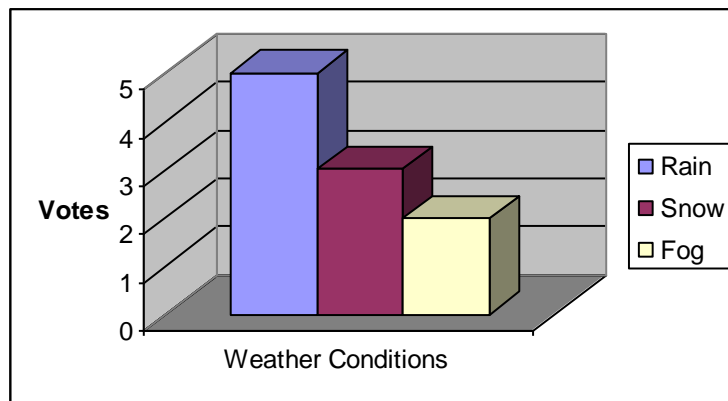
2. Adja meg, hogy az Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



Következtetések:

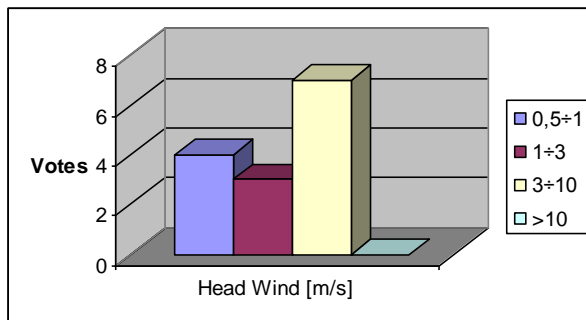
a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV esetleges alkalmazásai nem korlátozottak évszakok szerint, a lehetséges alkalmazások alapvetően a nyári hónapokra jellemzőek, de lényeges a bevetetőség biztosítása az évszakoktól függetlenül is.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

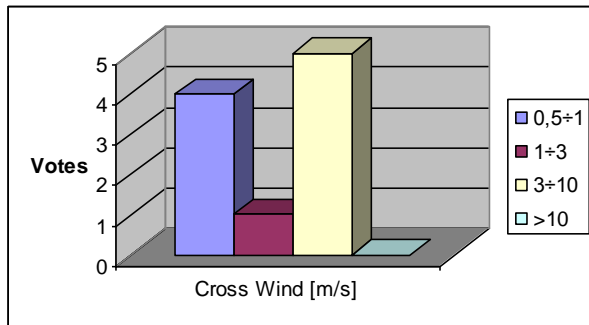


Következtetések:

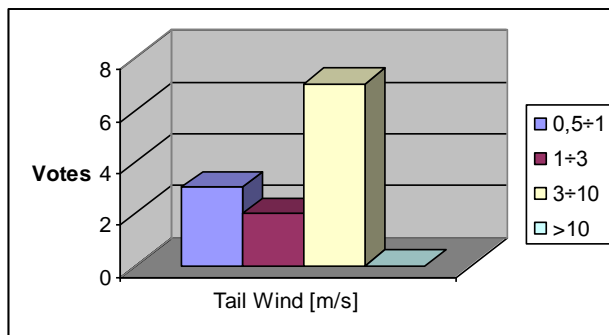
a kérdésre adott válaszokból megállapítható, hogy az UAV alkalmazások előfordulhatnak esős, illetve havas időben is. Megemlíteni szükséges, hogy a válaszadók kis hányada tudta meghatározni a csapadékfajtát, így a válaszokat kellő kritikával kell fogadni.



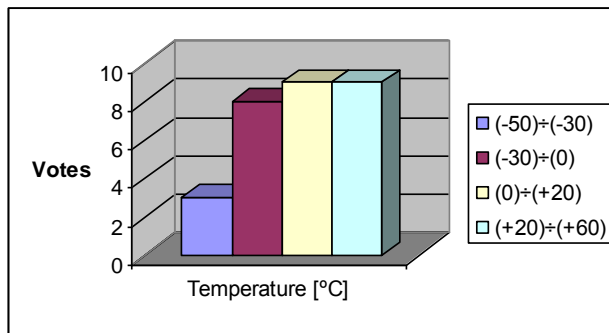
A válaszadók jelentős része ellenszélben is szükségesnek tartja az UAV-repülést. Az ellenszél maximális értékének $u_H \leq 10 \text{ m/s}$, ami számottevő, de nem extrém értékűnek tekinthető.



A válaszadók döntő többsége az UAV-repülés során megengedettnek tekinti a nagy értékű oldalszelet, aminek maximális értékét $v \leq 10 \text{ m/s}$ értékű sebességgel adták meg.



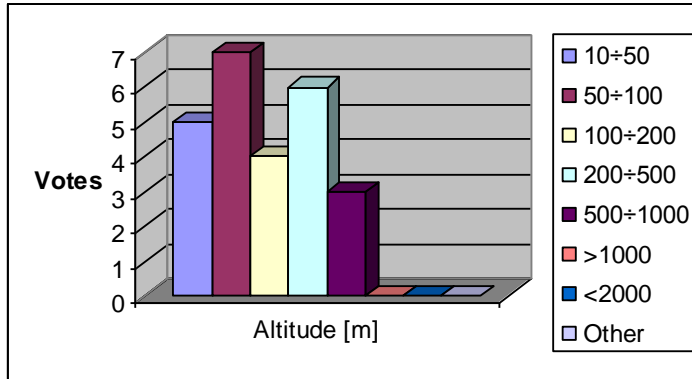
A válaszadók jelentős része erős hátszélben is szükségesnek tartja a repülést. A hátszél maximális értéke $u_T \leq 10 \text{ m/s}$. A jelentős hátszélben történő repülés hatékony a repülés során felhasznált energia minimalása során, minden esetre, más elvárások biztosítják, hogy a repülési sebesség állandó legyen. Mindazonáltal, a nagyértékű hátszél a felszállás során problémát okozhat, és a felszállási irány helyes megválasztása során figyelembe kell azt venni.



A válaszadók többsége a $T = ((-30) \div +60) \text{ } ^\circ\text{C}$ környezeti hőmérsékleti tartományban látja szükségesnek az UAV-repülést.

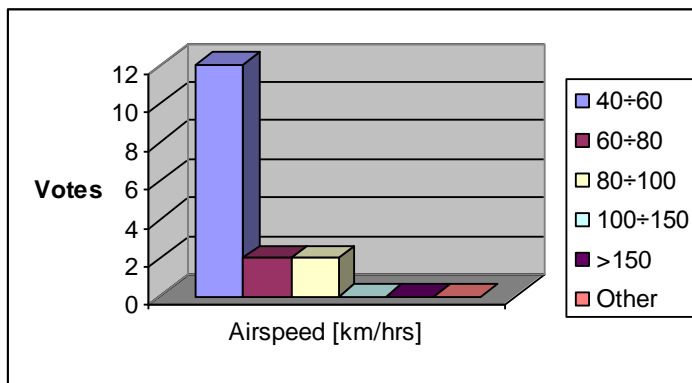
Össességében tehát megállapítható, hogy az értékelt válaszadói csoport szerint az UAV-kat akár extrém klimatikus viszonyok között, nagyon alacsony hőmérsékleten (pl. magas hegyek között, télen), és nagyon magas hőmérsékleten (sivatagos területen, nyáron) is szeretnék használni.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



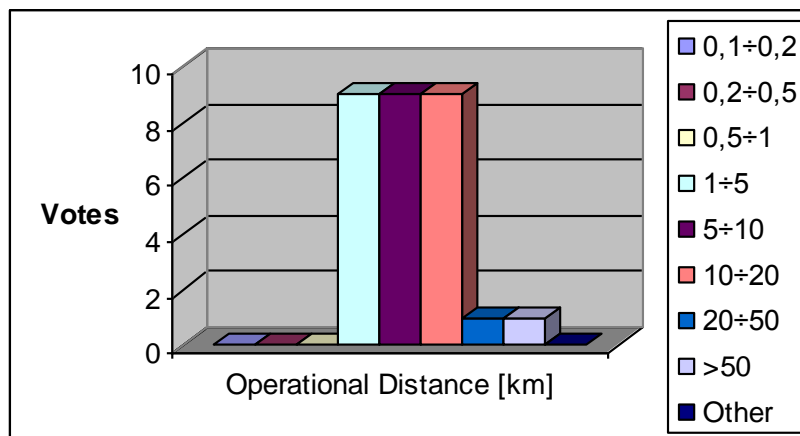
Következtetések

az UAV-k elvárt repülési magassága – a válaszadók jelentős része szerint – a $H = (10 \div 1000) m$ repülési magassági tartományban helyezkedik el.



Az UAV-k elvárt repülési sebessége a $v = (40 \div 100) km/h$ tartományba esik.

5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL

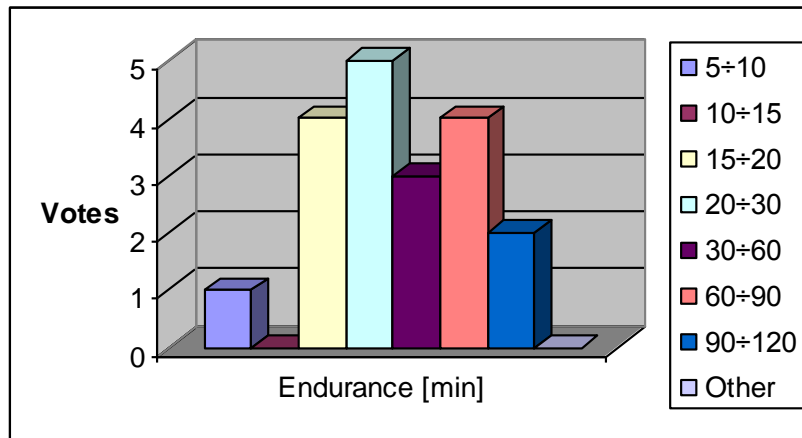


A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Következtetések:

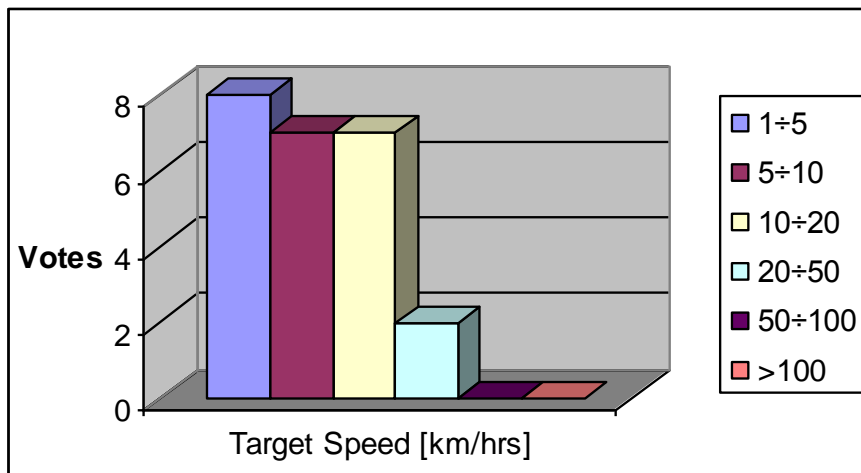
1. Az UAV-k elvárt repülési hatótávolsága – a válaszadók egy jelentős része számára – az $L = (1 \div 20) \text{ km}$ tartományba esik.
 2. A válaszadók másik kisebb csoportja az $L_{\max} \geq 20 \text{ km}$, valamint attól nagyobb hatótávolságot jelölte meg elvárt követelményként.
- 6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!**



Következtetések:

A válaszadók által megadott értékek alapján elmondható, hogy a repülési idő $t_{rep} = (5 \div 120) \text{ perc}$.

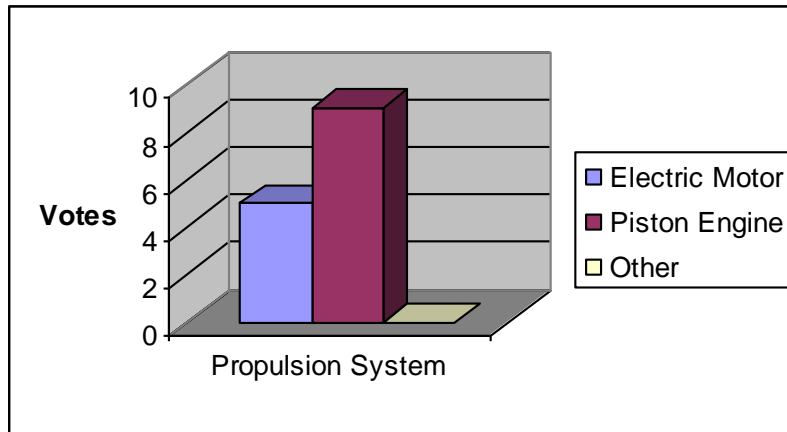
- 7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!**



Következtetések:

A megfigyelés tárgyát képező tárgyak, objektumok, személyek, a válaszadók jelentős többsége esetében $v = (1 \div 20) \text{ km/h}$ sebességgel mozognak.

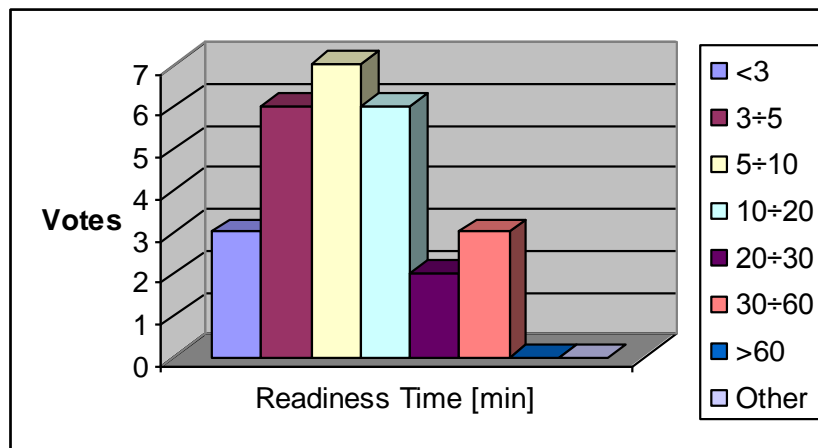
8. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?



Következtetések:

A válaszadók egyértelműen a belsőégésű, dugattyús repülőmotort jelölték meg a repüléshez szükséges energia forrásaként.

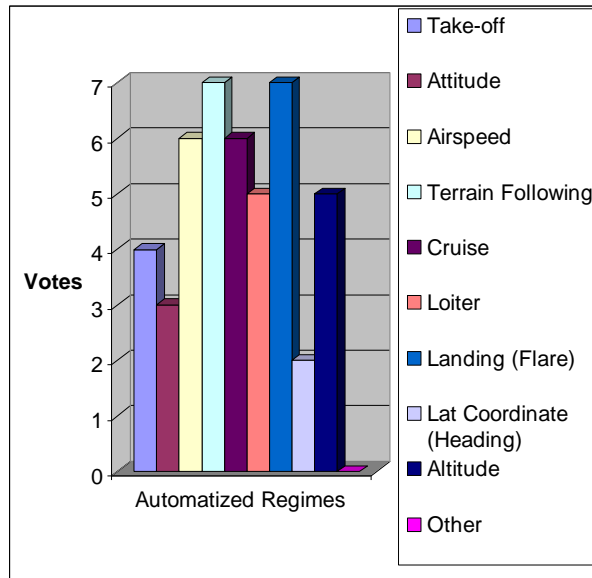
9. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készütségi idő mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?



Következtetések:

A válaszadók többsége által megadott készütségi idő értéke $t_{\text{készült}} = (3 \div 20) \text{ perc}$.

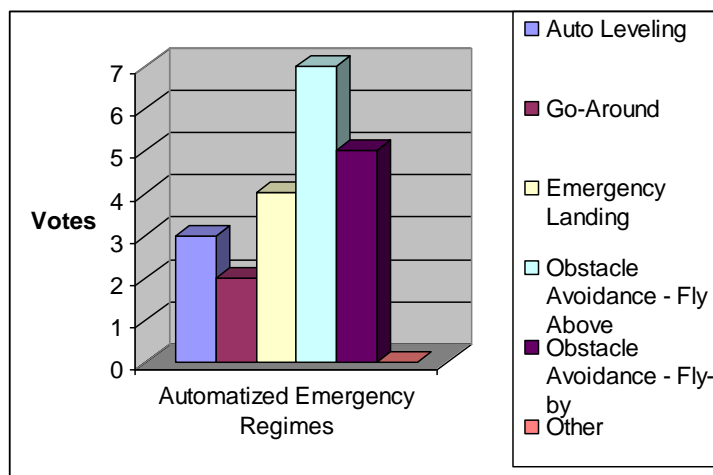
10. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!



Következtetések:

A válaszadók számos repülési üzemmódot jelöltek meg, amely automatizálását szükségesnek vélik. Az eredmények, és azok sokrétűsége alapján megállapítható, hogy a „vásárlói” igények – gyakorlatilag – vadászgépszerű, vagy a legmodernebb polgári szállító repülőgépeken alkalmazott rendszerek képességeire tartanak igényt.

11. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

Következtetések:

A válaszadók alapvetően a kényszerleszállás automatizálását, és a természetes és a mesterséges tereptárgyak átrepülését, és megkerülését végrehajtó vészhelyzetekben szeretnék bírni az automatizált repülés képességét.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

Az UAS-rendszerek széleskörű polgári-, és katonai alkalmazásának lehetősége ma már nem kérdés. A lehetséges alkalmazások egyes területein azonban felmerül a valós igény, hogy egyes esetekben nagyobb (pl. katasztrófa-elhárítási feladatok, rendvédelmi feladatok, határőrizeti feladatok stb.), míg más esetekben kisebb (pl. nemzeti parkok, természetvédelmi területek, tűzoltó alkalmazások stb.) repülési sebességgel repülni képes UAV álljon rendelkezésre. Nyilvánvaló, hogy az egyes alkalmazói igények kielégítése csak úgy történhet, ha más-más technológia szerint készített UAV-rendszert alkalmazunk. Magától értetődik, hogy pl. a nemzeti parkokban, természetvédelmi területen az adatgyűjtés villamos hajtású, forgószárnnyas UAV-rendszerrel kell történnjen, máskülönben a repülési feladat értelmét is veszítheti (pl. madarak, és más állatok megfigyelése).

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*, Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, p(59–65), Debrecen, 2007.
- [2] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: *Pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények vizsgálata – a „Bravo-csoport”, „Repüléstudományi konferencia – 70 éves a Légió”, Repüléstudományi Közlemények, különszám, ISSN 1789-770X, 2008. április 11., Szolnok.*
- [3] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények vizsgálata – az „Alpha-csoport”, Elektronikus Műszaki Füzetek V, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, p(23–33), Debrecen, 2008.*
- [4] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Conceptual Design of Unmanned Aerial Vehicle Systems for Non-Military Applications*, Proceedings of the 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies VSDIA 2008, ISBN 978-963-313-011-7, pp(637-644), BUTE, 10-12 November 2008, Budapest, Hungary.

[5] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Systems Used for Military Applications*, XVI. Magyar Repüléstudományi Napok CD-ROM kiadványa, ISBN 978-963-420-857-0, BME, 2008. november 13-14, Budapest.

[6] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Egy felmérés margójára – néhány gondolat a pilóta nélküli repülőgépek polgári és katonai alkalmazásáról*, Szolnoki Tudományos Közlemények XII., HU ISSN 2060-3002, 2008.

<http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2008/cikkek/szabolcsi-robot.pdf>

[7] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: *Pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszereinek minőségi követelményei*, „50 év hangsebesség felett a magyar légtérben” tudományos konferencia, 2009. április 24., Repüléstudományi Közlemények, On-line folyóirat, HU ISSN 1789-770X.

http://www.szrfrk.hu/rtk/kulonszamok/2009_cikkek/Szabolcsi_R-Meszáros_Gy.pdf

[8] Róbert SZABOLCSI *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems for the Firefighter Applications*, CD-ROM Proceedings of the 12th International Conference „AFASES 2010”, ISBN 978-973-8415-76-8, p4, 27-29 May 2010, Brasov, Romania.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

VI. RÉSZ

A POLICE-CSOPORT

	MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
	A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

I. BEVEZETÉS

A pilóta nélküli légitjárművek hatékony felderítő eszközök úgy a katonai-, mint az esetleges polgári alkalmazások során. Kifejezetten előnyös az alkalmazásuk az ún. D3 (Dull-Dirty-Dangerous) körülmények között, amikor az emberi kezelőszemélyzet nem tudja, vagy tiltott számára a bevetési terület megközelítése. E fejezet a POLICE-csoport kérdőíves válaszait mutatja be.

II. ELŐZMÉNYEK, SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK BEMUTATÁSA

A szerző önálló tudományos felmérésnek eredményeit mutatja be. Az [1, 2, 3, 5] cikkek az UAV polgári alkalmazásait mutatják be. A [4] irodalom szakmai műhely alapítását taglalja, míg az [5] irodalom a válaszadók által megfogalmazott műszaki követelményeket adja mutatja be. A [6] a rendőri erők UAV alkalmazásokra vonatkozó szakmai véleményét mutatja be.

III. A POLICE-CSOPORT ÁLTAL MEGFOGALMAZOTT MŰSZAKI KÖVETELMÉNYEK

3.1. A POLICE-csoport válaszainak előzetes statisztikai elemzése

A POLICE-csoport 11 vezető rendőri szakértőt foglal magába. A csoport válaszainak előzetes statisztikai elemzését az 1. Táblázat mutatja be.

A „POLICE”-csoport

1. Táblázat

Postázott kérdőívek száma	Kézbcsített kérdőívek száma	Nem kézbcsített kérdőívek száma	Megválaszolt felkérések száma	Kitöltött kérdőívek száma
11 (100 %)	11 (100 %)	0 (0 %)	8 (≈73 %)	5 (≈63 %)

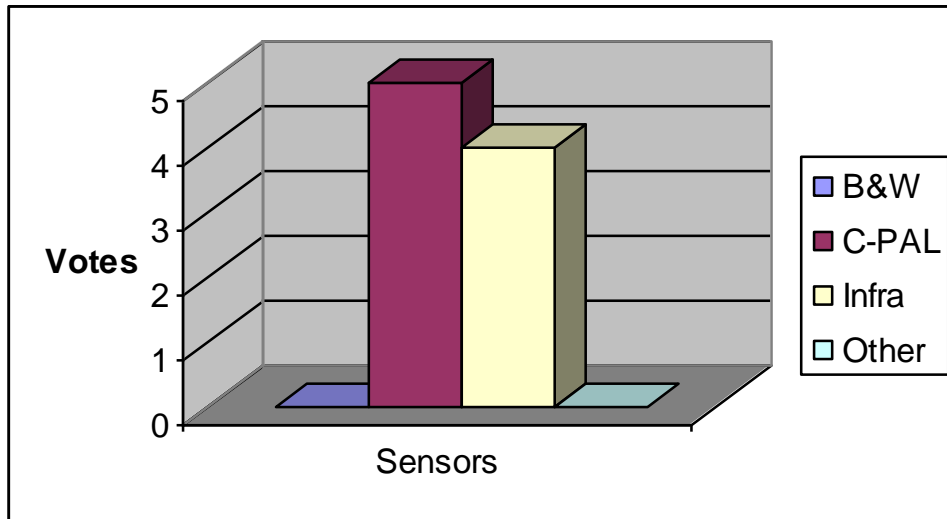
Az 1. Táblázat alapján megállapítható, hogy a Police-csoport pozitívan állt a kérdőívek megválaszolásához, és azok kitöltéséhez. (8 szakértő válaszolt a megkeresésre, és a 8 válaszadóból 5 kiértékelhető válaszokat adott).

3.2. UAV-rendszerek koncepcionális tervezése rendőri alkalmazásokra

A vezető rendőri szakértők válaszait az alábbiakban mutatjuk be.

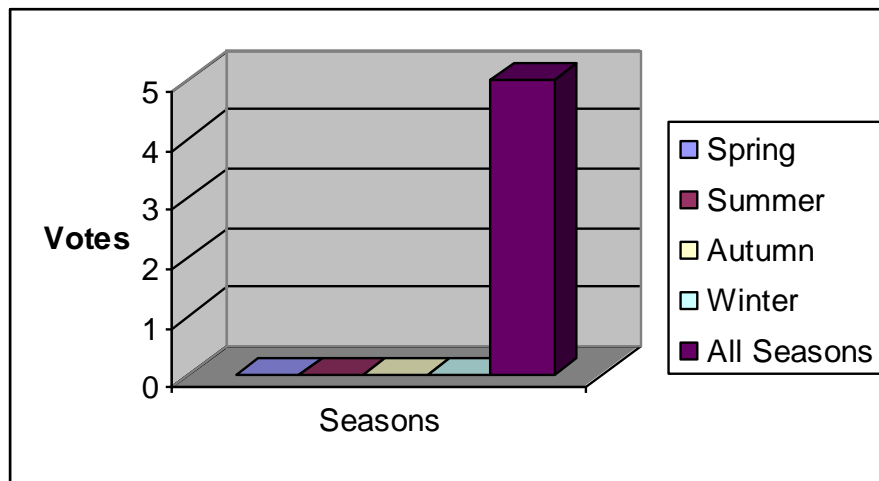
  A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetség gondozásban (KOVÁSZ)
---	---

1. Adja meg, hogy milyen jellegű információ szolgáltatását várja el a pilóta nélküli repülőgépektől?!



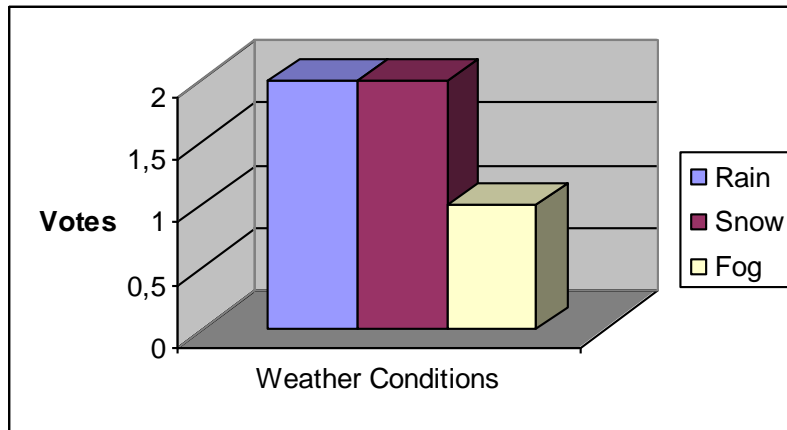
A válaszadók többsége színes-, illetve infrakamera jelre tart igényt. A hagyományos jelek (fekete-fehér stb.) gyakorlatilag nincs igény.

2. Adja meg, hogy az Ön szakterületén mely évszak(ok)ban véli lehetségesnek, és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



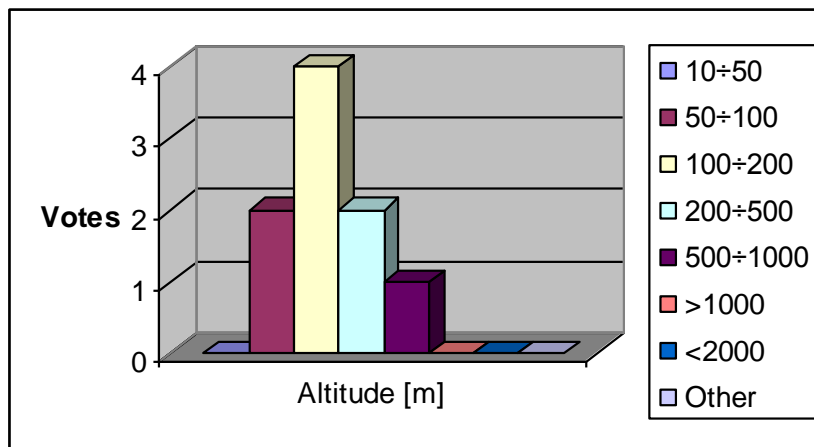
Kétségtelen, hogy a válaszadók kizárólagosan a minden évszakban történő alkalmazás mellett tették le a voksukat.

3. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen időjárási feltételek mellett véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

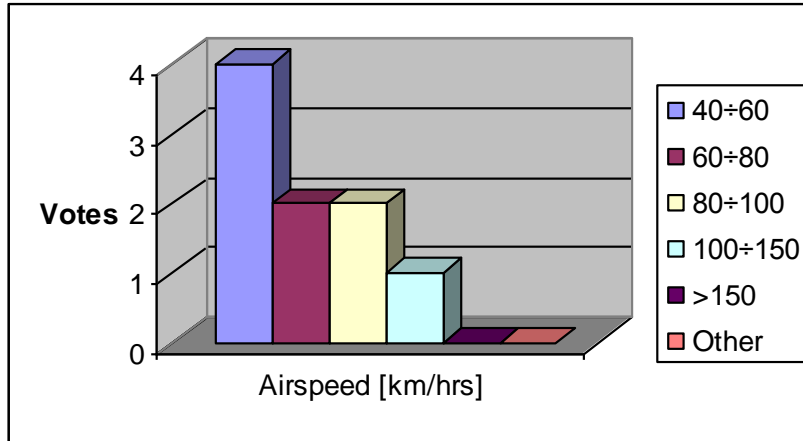


A szakértői vélemények szerint, az UAV alkalmazások szinte tetszőlegesen rossz időjárási körülmények között, úgy esős, havas, mint ködös időben végrehajthatónak kell lenniük.

4. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési tartományban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!

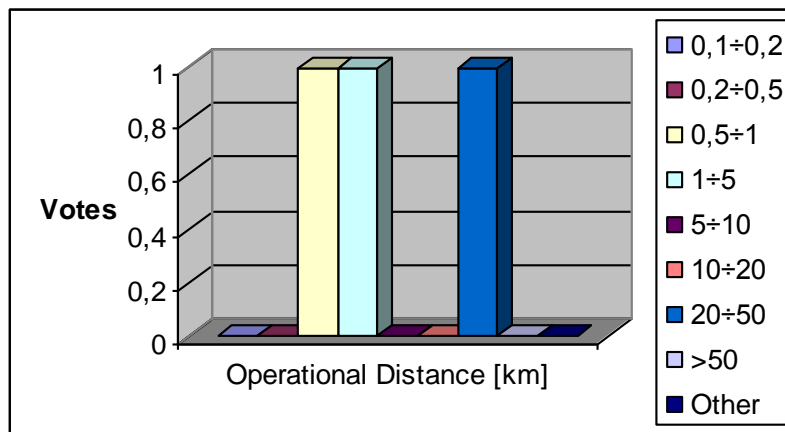


A szakértői vélemények alapján, az UAV repülési tartomány $H = (50 \div 500) m$ repülési magassági tartományba esik. Tekintettel a szakértői véleményekre, legyen a repülési magasság maximális értéke $H_{\max} = 500 m$.



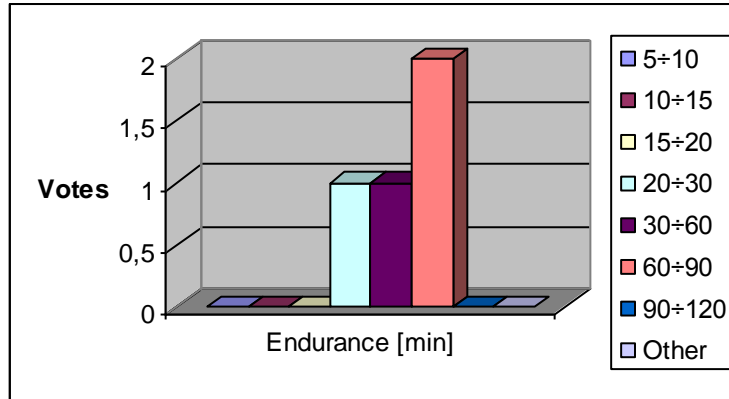
A szakértői vélemények alapján, az UAV repülési sebességi tartománya a $v = (40 \div 150) \text{ km/h}$ repülési sebességi tartományba esik. Tekintettel a szakértői véleményekre, legyen a repülési sebesség maximális értéke $v_{\max} = 150 \text{ km/h}$.

5. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen repülési hatótávolságban véli lehetségesnek és szükségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását!



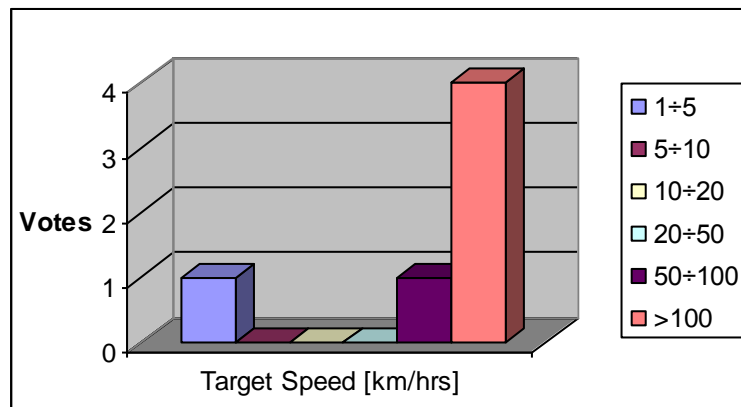
A szakértői vélemények az UAVk $L = (0,5 \div 5) \text{ km}$ hatótávolságú repülésére szavazott, ami. Főleg rossz időjárási körülmények, illetve éjszakai repülések esetén a vizuális látóhatáron túéi repülést jelenti. A vélemények alapján a maximális hatótávolság $L_{\max} \geq 5 \text{ km}$.

6. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek milyen repülési idővel kell rendelkezzenek!



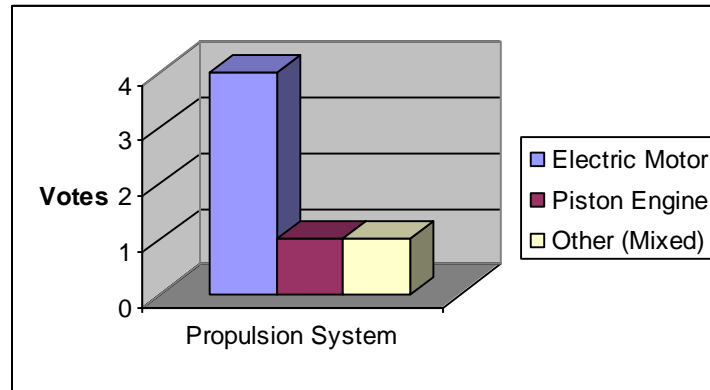
A szakértői véleménynek alapján a repülési idő a $t_{endur} = (20 \div 90)$ perc tartományba esik.

7. Adja meg, hogy az Ön szakterületén az esetleges felszíni mozgó objektumok, és személyek milyen sebességgel mozognak!



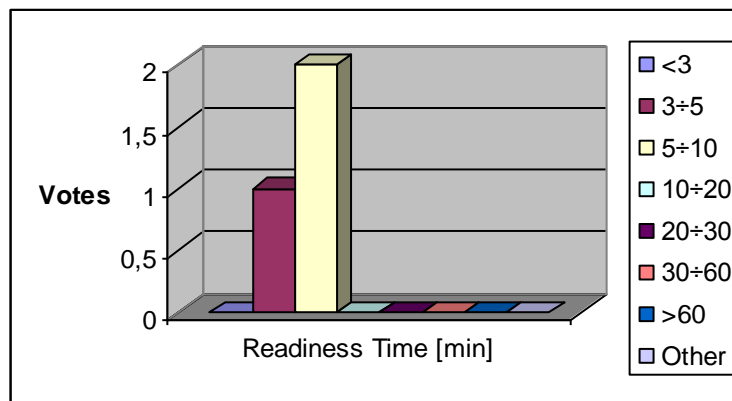
A szakértői vélemények alapján az esetlegesen megfigyelt objektumok átlagos sebessége a $v = (5 \div 100) \text{ km/h}$ sebességi tartományba esik. Megemlíteni szükséges, hogy szükséges az extrém kisértékű sebességgel mozgó célok megfigyelése is. E sebességi tartomány előre vetíti a quadrotor-, vagy helikopter-technológiák alkalmazásának szükségességét.

8. Milyen hajtás alkalmazását javasolja?



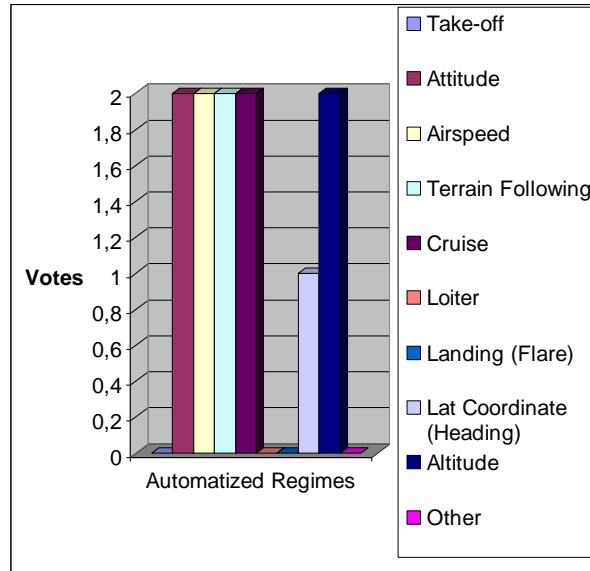
A szakértői vélemények alapján egyértelműen megállapítható, hogy a szakértők többsége a villamos motoros meghajtású UAV-alkalmazásokat preferálja. Magától értetődik, hogy a villamos meghajtású UAVk kis értékű hangemissziója az első helyre helyezi ezeket a technológiákat. Érkezett szavazat a belsőégésű motoros, és a vegyes hajtású UAV-ra is.

9. Adja meg, hogy az Ön szakterületén milyen készütségi idő mellett véli lehetségesnek a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazását?



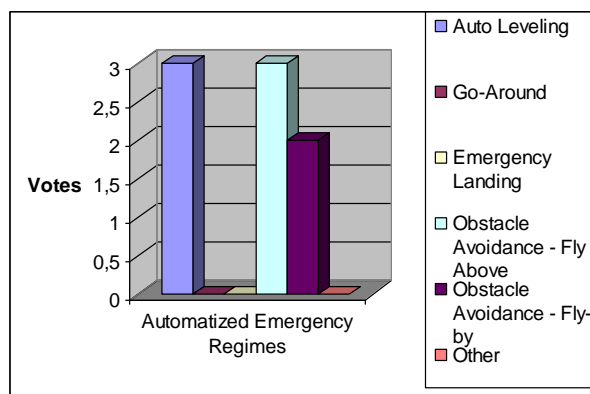
A szakértők a készütségi időt a $t_{ready} = (3 \div 10)$ perc közötti tartományba teszik. E kis értékű idő feltételezi, hogy akár a bevetési csoport (esetleg gyors reagálású erők) is kell rendelkezzenek ezzel a technológiával, és szükség esetén kéznél van a technológia.

10. Adja meg, hogy az Ön szakterületén a pilóta nélküli repülőgépek földi és légi üzemeltetése mely fázisainak automatizálását látja szükségesnek?!



A szakértők szinte az összes lehetséges repülési fázis automatizálását igénylik.

11. Adja meg, hogy az Ön szakterületén, vagy véleménye szerint a pilóta nélküli repülőgépek milyen veszélyes repülési üzemmódjainak automatizálást tartja szükségesnek!



A szakértői vélemények többsége az automatikus vízszintesbe kivezetés, és a tereptárgyakkal történő összeütközés elkerülésének automatizálását kívánják egy lehetséges UAV alkalmazásban.

V. KÖVETKEZTETÉSEK

A fejezet az UAV esetleges rendőri alkalmazásokkal foglalkozik. A lehetséges UAV alkalmazások a rendőri vezetők figyelmét felkeltették, és megfelelő aktivitást mutattak a felmérés során. A elvárások főleg a minden évszakban, minden időben bevethető, villamos hajtású UAVk felé mutatnak, amelyek színe skamera képet, vagy infrakamera képet sugároznak le a földi állomásra.

VI. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.
- [2] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2008.
- [3] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. „70 éves a légierő” tudományos konferencia CD-ROM kiadványa, Repüléstudományi Közlemények, Különszám, 2008. április 11.
- [4] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert – MÉSZÁROS György: A new initiative – a new scientific research program „Computer aided design and analysis of the vehicle systems”, CD-ROM Proceedings of the Vth International Symposium on Defense Technology, HU ISSN 1416-1443, 21-22 April 2008, Budapest, Hungary.
- [5] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Egy felmérés margójára – néhány gondolat a pilóta nélküli repülőgépek polgári és katonai alkalmazásáról, Szolnoki Tudományos Közlemények, HU ISSN 2060-3002, 2008, Szolnok, Hungary.
- [6] Róbert SZABOLCSI *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems for the Police Applications*, CD-ROM Proceedings of the 12th International Conference „AFASES 2010”, ISBN 978-973-8415-76-8, p4, 27-29 May 2010, Brasov, Romania.

VII. RÉSZ

PILOTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZEREINEK MINŐSÉGI KÖVETELMÉNYEI



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. BEVEZETÉS

A pilóta nélküli repülőgépek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV), vagy mai modern elnevezéssel, a pilóta nélküli repülő-rendszerek (Unmanned Aerial Systems – UAS) úgy katonai, mint a polgári alkalmazási területeken kiválóan alkalmazhatóak információgyűjtési célból. Mivel a gyakorlatban nagyon sokszor a vizuális látótávolságon túl kell repülni, ezért felmerül a repülés egyes fázisai (pl. felszállás, útvonalrepülés, süllyedés, leszállás stb.) automatizálásának problémája.

A legfontosabb kérdés, amely megválaszolása nélkül nem épülhet repülésszabályozó rendszer: milyenek az automatikus repülésszabályozó rendszerrel szemben támasztott minőségi követelmények?! A szerzők célja elsőként bemutatni, hogy az elmúlt időszakban általuk elvégzett végzett tudományos felmérés, és az abból levont következtetések hogyan alkalmazhatóak az UAS rendszerek automatikus repülésszabályozó rendszerei minőségi követelményeinek meghatározására.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az UAV, illetve az UAS rendszerek repülésszabályozó rendszerei mind a mai napig nem rendelkeznek előírt minőségi követelményrendszerrel. Felmerül a kérdés, hogy milyen módon határozzuk meg az UAS rendszerek minőségi követelményeit?!

Magától kínálkozik egy egyszerű elv: a pilóta által irányított repülőgép automatikus repülésszabályozó rendszerei rendelkeznek előírt minőségi követelményrendszerrel, így hát alkalmazhatjuk azokat. Tekintettel eme több évtizedes szabályozó-rendszerre, felmerül a kérdés, hogy a benne foglalt normák hogyan alkalmazhatóak az UAS rendszerekre?! Szűkíteni, vagy bővíteni kell azokat?!

A pilóták által irányított légi járművekkel szemben támasztott kormányozhatósági-, és irányíthatósági követelményrendszert – összegezve több évtized szakmai tapasztalatát, és kultúráját – az [1] katonai szabvány adja meg. SZEGEDI [2] részletesen foglalkozik UAV repülőgépek repülésszabályozó rendszere szabályozóinak előzetes tervezésével. A UAV és az UAS alkalmazások lehetőségeivel a [7] irodalom mutatja be egy tudományos kutatási program főbb elemeit. Az UAV és az UAS polgári alkalmazásainak lehetőségeit a [3, 6, 9] irodalmak mutatják be részletesen, míg a katonai alkalmazásokkal a [8] irodalom foglalkozik, és mutatja be egy reprezentatív, tudományos felmérés eredményeit. A légköri turbulencia sztochasztikus, és determinisztikus matematikai modelljeit a [4, 5] irodalmak mutatják be.

POKORÁDI [10] részletesen foglalkozik a sztochasztikus jelek statisztikai leírásával. A repülőgépek földi kiszolgálásának matematikai modellezésére a Markovi-, és a fél-Markovi sztochasztikus folyamatok leírását alkalmazta, míg a légi járművek fedélzeti műszaki rendszerei diagnosztikai problémáinak leírására, és megoldására szintén a statisztikus módszert alkalmazta.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

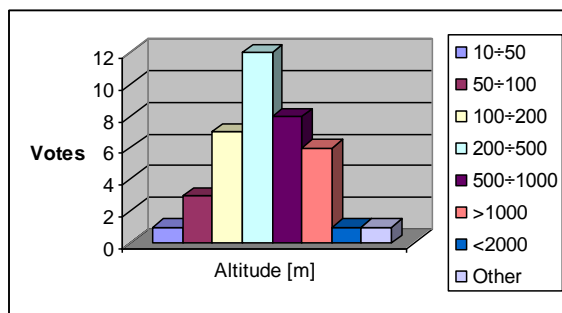
TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

III. KÍSÉRLETI UAS AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZEREINEK MINŐSÉGI KÖVETELMÉNYEI

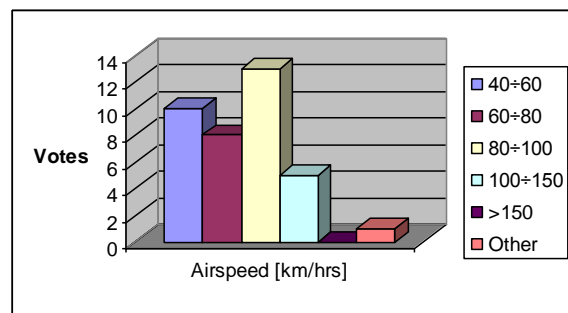
A pilóta nélküli repülőgépek lehetséges polgári, és katonai alkalmazásával kapcsolatban SZABOLCSI országos, reprezentatív tudományos felmérést végzett [3, 8, 9], és kutatási programot hirdetett [7]. E kutatás eredményeképpen, felmérve az alkalmazók elvárásait, az UAS rendszerek, valamint azok automatikus repülésszabályozó rendszerei számára az alábbi fontosabb megállapítások tehetők.

3.1. Kísérleti UAS repülési tartománya

A felmérés eredményeképpen, a kísérleti UAS rendszer repülési tartománya a következő paraméterekkel írható le (1. ábra) [3, 6, 7, 8, 9]:

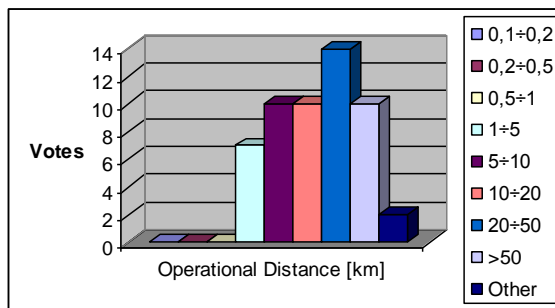


1-a. ábra. Repülési magasság [m].



1-b. ábra. Repülési sebesség [km/h].

Mint az az 1-a., és az 1-b. ábrákon is jól látható, az UAS elvárt tipikus repülési magassága – a válaszadók jelentős része szerint – a $H \leq (50 \div 1000) m$ repülési magassági tartományban helyezkedik el. Az UAS rendszer elvárt repülési sebessége a $v \leq (40 \div 150) km/h$ tartományba esik.



1-c. ábra. Hatótávolság [km].

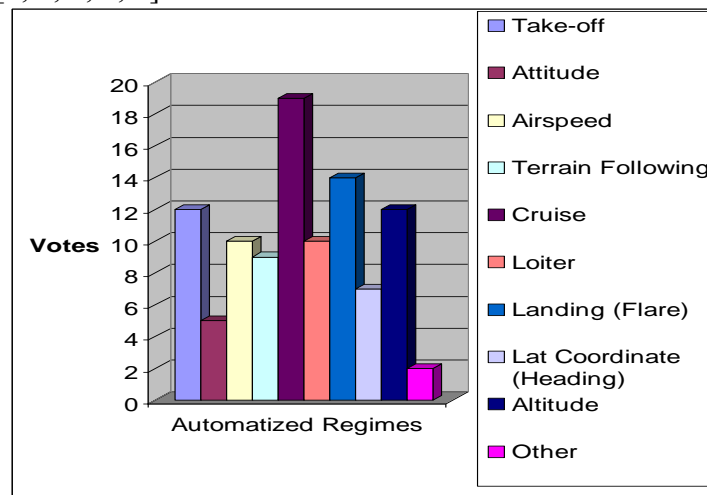
Az UAS rendszerek elvárt repülési hatótávolsága – polgári alkalmazások esetén – tipikusan az $L \leq (1 \div 50) km$ tartományba esik. Az UAS katonai alkalmazások esetén a válaszadók egy nagy csoportja az $L_{max} \geq 50 km$,

valamint attól nagyobb hatótávolságot jelölte meg elvárt követelményként.

Tekintettel a felmérés sajátosságaira, ami kisméretű, korlátozott manőverező képességű UAS rendszerek alkalmazását jelenti, elmondhatjuk tehát, hogy az elvárt hatótávolság maximális értéke $L_{\max} \leq 50 \text{ km}$. A kísérleti UAS rendszer elvárt repülési tartományának paraméterei alapján az UAS rendszer sárkányszerkezete, a hajtómű rendszere, és más repülőgépészeti tervezése már elvégezhető.

3.2. Kísérleti UAS automatikus repülésszabályozó rendszere tervezett normál repülési üzemmódjai

A felmérés eredményeképpen, a kísérleti UAS rendszer normál repülési üzemmódjai az alábbiak (2. ábra) [3, 6, 7, 8, 9]:



2. ábra. Kísérleti UAS rendszer normál repülési üzemmódjai.

A felmérés eredményeképpen elmondhatjuk, hogy repülés automatizálása annak szinte összes repülési fázisára kiterjed (pl. automatikus fel-, és leszállás; térbeli szöghelyzet (dőlés, bólintás, irány) stabilizálás; repülési sebesség stabilizálása; kismagasságú repülések automatizálása – repülési magasság stabilizálása, emelkedés, süllyedés, egyéb más, magasság változtatással járó manőverek; programozott útvonalrepülések – a felszállás és a leszállás helye között; más üzemmódok – pl. statikus objektumok megfigyelése, adatvesztés esetén „hazatérés” automatikus végrehajtása).

A felmérés eredményeképpen elmondható, hogy a kísérleti UAS rendszerrel szemben támasztott követelmények „vadászrepülőgép”-szerűek. Könnyen belátható, hogy a kisméretű,

korlátozott manőverező-képességű UAS rendszer minden felhasználói elvárását egyidőben nem teljesíthet, ezért szüksége van egy ésszerű kompromisszumra, ami első közelítésben kielégíti a lehetséges alkalmazókat.

A kísérleti UAS rendszer koncepcionális tervezése során az alábbi feltételekből indulunk ki:

1. csak és kizárólag polgári alkalmazásokkal foglalkozunk;
2. az UAS rendszer többször is alkalmazható;
3. az UAS felszállása, valamint a leszállás előtti manőverek, és maga a leszállás kézi irányítású.

Mindezen megfontolások alapján az UAS rendszer alábbi repülési üzemmódjainak automatizálása szükséges: térbeli szöghelyzet stabilizálás; repülési sebesség stabilizálása; repülési magasság stabilizálása. E repülési üzemmódokon a pilóta által irányított légi járművek esetén a minőségi követelményeket az [1] szabvány adja meg részletesen.

Tekintettel az UAS rendszer sajátosságaira, a fent felsorolt repülési üzemmódokon az automatikus repülésszabályozó rendszer – megfelelő átmeneti függvényein értelmezett – fontosabb minőségi követelményei legyenek az alábbiak.

1. Táblázat. A kísérleti UAS rendszer csillapító automatájának minőségi követelményei.

Üzem mód	Minőségi jellemzők																	
	Túlszabályozás, σ [%]			Csillapítási tényező, ξ			Tranziens idő, t_{ss} [sec] ($\Delta = \pm 10\%$)			Lengésszám, N			Erősítési tartalék, κ , [dB]			Fázistartalék, φ_t , [fok]		
	σ_x	σ_y	σ_z	ξ_x	ξ_y	ξ_z	ω_{xss}	ω_{yss}	ω_{zss}	N_x	N_y	N_z	κ_x	κ_y	κ_z	φ_{tx}	φ_{ty}	φ_{tz}
Csilla pítő autom ata	$\leq 30\%$			0,2 ÷ 0,8			≤ 2	≤ 4	≤ 3	≤ 5			$\kappa \geq 2$			$\varphi_t \geq 15^0$		

2. Táblázat. A kísérleti UAS rendszer robotpilótájának minőségi követelményei.

Üzem mód	Minőségi jellemzők					
	Túlszabályozás, σ [%]	Csillapítási tényező, ξ	Tranziens idő, t_{ss} [sec] ($\Delta = \pm 10\%$)	Lengésszám, N	Erősítési tartalék, κ , [dB]	Fázistartalék, φ_t , [fok]
ϑ stabilizálás	20	$\leq 0,3$	≤ 4	≤ 3	$\kappa \geq 5$	$\varphi_t \geq 30^0$
γ stabilizálás	20	$\leq 0,4$	≤ 3			
ψ stabilizálás	30	$\leq 0,3$	≤ 5	≤ 5	$\kappa \geq 2$	$\varphi_t \geq 15^0$

3. Táblázat. A kísérleti UAS rendszer pályavezérlő rendszerének minőségi követelményei.

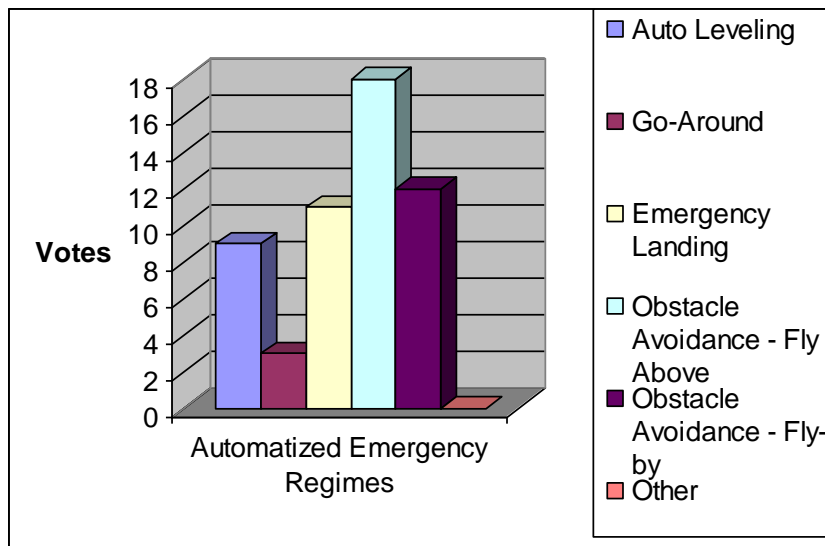
Üzem mód	Minőségi jellemzők					
	Túlszabályozás, σ [%]	Csillapítási tényező, ξ	Tranziens idő, t_{ss} [sec]	Lengésszám, N	Erősítési tartalék, κ , [dB]	Fázistartalék, φ_t , [fok]
„V” stabilizálás	5	$\leq 0,5$	≤ 10	≤ 3	$\kappa \geq 5$	$\varphi_t \geq 30^0$
„H” stabilizálása	10		≤ 5	≤ 5		

A fenti táblázatokban (1-3) foglalt minőségi követelmények nem teljes körűek, azokat csak és kizárólag a kísérleti repülőgép rövidperiodikus mozgására írtuk fel. Magától értetődik, hogy a későbbiekben a hosszúperiodikus mozgás minőségi jellemzőit is definiálni szükséges. Mivel az [1] katonai szabvány pilóta által vezetett repülőgépre állították össze, ezért mérlegelés tárgyát képezi, hogy az abban foglaltak mely részét fogadjuk el. Egyes részeit (pl. az automatikus repülésszabályozó rendszer alapja a csillapító automata, amely csökkenti a test-koordináta rendszer tengelyei körül a lengéseket), teljes egészében elfogadhatjuk. A szabvány egyes részeit (pl. az utasok komfort érzetét biztosító követelmények, terhelési többszörösök nagymértékű korlátozása stb.) teljes egészében elvetjük el. És végezetül, a

szabvány egyes fejezeteit és normáit (pl. több előjelváltó lengés is megengedett), módosítással, az UAS rendszerre történt adaptálás után elfogadhatjuk. Nyilvánvaló, hogy a fenti módszertan csak és kizárólag vonalvezetőt ad a kísérleti UAS komplex minőségi követelményrendszerének meghatározásához. Könnyű belátni, hogy az UAS rendszerrel szemben támasztott funkcionális-, stabilitási-, klimatikus-, és egyéb feltételek meghatározása esetén a fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszerrel szemben támasztott követelmények a rendelkezésre álló szabványok segítségével, illetve a tervező döntéseivel egyértelműen meghatározhatóak.

3.3. Kísérleti UAS automatikus repülésszabályozó rendszere tervezett vészhelyzet-kezelő repülési üzemmódjai

A kísérleti UAS rendszer felhasználók által elvárt, és a veszélyes repülési üzemmódokat kezelő automatizált üzemmódjait a 3. ábra foglalja össze [3, 6, 7, 8, 9].



3. ábra. Kísérleti UAS rendszer vészhelyzet-kezelő automatikus repülési üzemmódjai.

A 3. ábrán jól látható, a legtöbb lehetséges felhasználó a vízszintes repülési helyzetbe történő kivezetést, a kényszerleszállást, valamint a tereptárgyakkal történő ütközés elkerülését tartja a legfontosabbnak.

Felmerül a kérdés, hogy a veszélyes repülési üzemmódokon hogyan fogalmazzuk meg az UAS rendszerrel szemben támasztott stabilitási-, kormányozhatósági-, és irányíthatósági minőségi követelményeket?! Tekintettel arra, hogy az UAS többször is alkalmazható, a vészhelyzeti algoritmusok tegyenek eleget a következő feltételeknek:

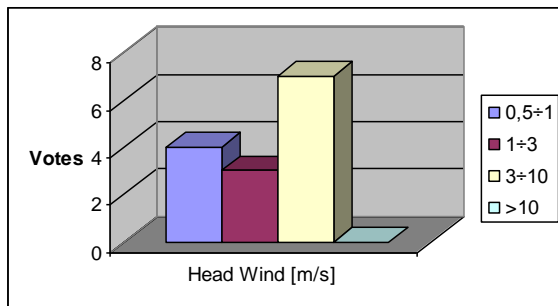
1. tegyék lehetővé a veszélyes repülési helyzetek elkerülését (pl. átrepülés tereptárgyak felett);

2. ha nem sikerül elkerülni a veszélyes repülési helyzetet, akkor tegye lehetővé a biztonságos, minimális sérüléssel járó leszállást.

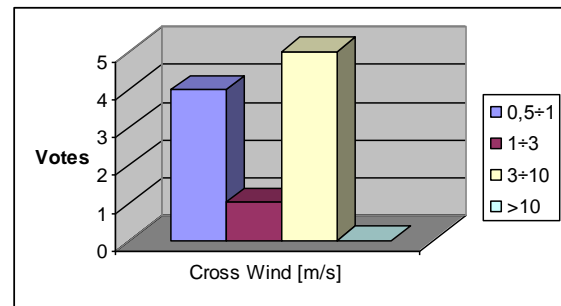
A vészhelyzeti repülési pályák megtervezése után a stabilitási-, kormányozhatósági-, és irányíthatósági minőségi követelményeket már meghatározhatóak. E követelményrendszer felállításához segítséget nyújthat a normál repülési helyzetekre megadott minőségi követelményrendszer.

3.4. Kísérleti UAS repülési feltételei

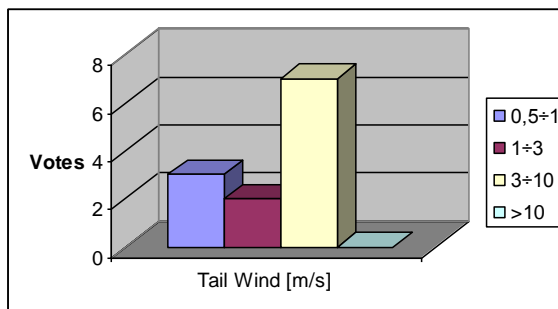
Az UAS rendszerek koncepcionális-, és előzetes tervezése során elengedhetetlen a repülési környezet néhány fontos paramétereinek ismerete. A korábban is hivatkozott felmérés adatait a 4. ábra foglalja össze [3, 6, 7, 8, 9].



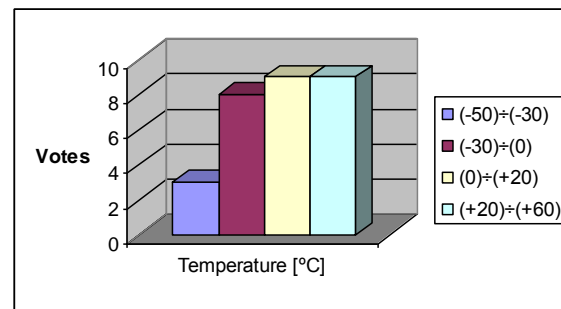
4-a. ábra. Repülés ellenszélben.



4-b. ábra. Repülés oldalszélben.



4-c. ábra. Repülés hátszélben.



4-d. ábra. A repülés környezeti hőmérséklete.

A 4-d. ábra alapján elmondható, hogy a kísérleti UAS tervezett alkalmazásai szélsőséges hőmérsékleti tartományban tartják szükségesnek. Más szóval, a hazánkban mérhető legalacsonyabb hőmérséklet mellett is biztosítani szükséges az UAS rendszer repülését. A felhasználói igények csapadékos időben, és meglehetősen nagy erősségű szélben is szükségesnek (4-a. – 4-c. ábra) tartják az UAS rendszer repülését. E probléma megoldását segítik, és nagyban támogatják a [4, 5] irodalmak, amelyek részletesen taglalják a determinisztikus és a sztochasztikus légköri turbulencia modellek jellemzőit, és azok meghatározását, majd számítógépes szimuláció segítségével – a repülésszabályozó rendszer

szabályozóinak előzetes tervezése során is jól alkalmazható – idősorokat hoztak létre kismagasságú turbulencia-modellekre. A szeles időben történő UAS alkalmazások előre vetítik, hogy a zárt szabályozási rendszerek kellő robusztussággal kell, hogy rendelkezzenek – ellenkező esetben a repülés alapvető célja sem teljesülhet [4, 5].

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

Az UAS rendszerek polgári-, és katonai alkalmazásáról készített felmérés jó alapot ad egy kísérleti UAS rendszer koncepcionális, és előzetes tervezéséhez. A felmérés számos területe fed le. A szerzők e területek közül kiválasztották egy hipotetikus, kísérleti UAS rendszert, amely néhány normál-, és vészhelyzeti repülési üzemmódján megadták a fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszer rövidperiodikus mozgásra vonatkoztatott minőségi követelményeit. A követelmények megfogalmazása során csak részben támaszkodtak a létező, de nem teljesen átvehető szabványokra. A hiányos területeken – saját tervezői tapasztalatuk alapján – maguk fogalmazták meg a minőségi követelményeket.

A normál repülési üzemmódokra a minőségi jellemzők követelmény-rendszere nagyrészt megfogalmazott, míg a vészhelyzeti repülési üzemmódokra a szerzők megfogalmazták az elvi követelményeket. Eme elvi követelmények alapján a vészhelyzeti repülési pályákat megtervezni szükséges, ezután pedig az egyes pályaszakaszokhoz a minőségi követelményeket már hozzá tudjuk rendelni. E feladatok megoldása további vizsgálatokat, és további tudományos kutatómunkát igényel, és a közeljövőben a szerzők kutatási területeinek fontos részét képezik.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MIL-STD-1797A, Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft, Department of Defense, Interface Standard, 2004.
- [2] SZEGEDI Péter: Repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak számítógépes analízise és szintézise, PhD értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, 2005.
- [3] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, pp (59–65), Debrecen, 2007.
- [4] Dr. habil. SZABOLCSI Róbert: Mathematical Models for Gust Modeling Applied in Automatic Flight Control Systems' Design, CD-ROM Proceedings of the "5th International Conference in the Field of Military Sciences 2007", 13-14 November 2007, Budapest, Hungary.

- [5] SZABOLCSI Róbert — MÉSZÁROS György: Computer Aided Simulation of the Random Atmospheric Turbulences, CD-ROM Proceedings of the 6th International Conference on Crisis Management, ISBN 978-80-7231-510-9, pp(366-379), 14-15 May 2008, Brno, Czech Republic.
- [6] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert — MÉSZÁROS György: Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. „70 éves a légió” tudományos konferencia CD-ROM kiadványa, Repüléstudományi Közlemények, Különszám, 2008. április 11.
- [7] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert — MÉSZÁROS György: A new initiative – a new scientific research program „computer aided design and analysis of the vehicle systems”, CD-ROM Proceedings of the Vth International Symposium on Defense Technology, ”, HU ISSN 1416-1443, 21-22 April 2008, Budapest, Hungary.
- [8] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Systems Used for Military Applications*, XVI. Magyar Repüléstudományi Napok CD-ROM kiadványa, ISBN 978-963-420-857-0, BME, 2008. november 13-14, Budapest.
- [9] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: *Conceptual Design of Unmanned Aerial Vehicle Systems for Non-Military Applications*, Proceedings of the 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies VSDIA 2008, ISBN 978-963-313-011-7, pp(637-644), BUTE, 10-12 November 2008, Budapest, Hungary.
- [10] PROF. DR. POKORÁDI László: Rendszerek és folyamatok modellezése, ISBN 978-963-9822-06-1, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.

II. FEJEZET

UAV AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÁSA, SZABÁLYOZÓTERVEZÉS



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. RÉSZ

KATONAI ROBOTOK SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT LQR⁷-ALAPÚ OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

⁷ Linear Quadratic Regulator

 <p>MAGYARORSZÁG MEGÚJUL</p>	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
 <p>A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.</p>	

BEVEZETÉS

A robotok széles körben alkalmazott eszközök. Úgy polgári, mint katonai alkalmazások területén számos lehetséges alkalmazási terület nyílik. A robotok – képességeik révén – lehetővé teszik olyan műveletek végrehajtását is, ami sok esetben nem lehetséges emberi beavatkozás révén. A fejezetben a szerző a pilóta nélküli repülőgépek (Unmanned Aerial Vehicle) repülésének automatizálásával foglalkozik. Az UAV felhasználók számos területen elvárják, hogy a repülések egyes fázisaiban legyen lehetőség az automatizált repülések végrehajtására. Az UAVk közül a multirotoros légi járművek repülésszabályozásával foglalkozik a fejezet. A quadrotor elrendezésű légi járművek függőleges tengely mentén történő mozgásának automatizálása biztosítja az automatikus magasságváltoztatás lehetőségét.

1. BEVEZETÉS, MOTIVÁCIÓ

A robotika, és a mechatronika legújabb tudományos eredményei alapján tervezett robotok katonai alkalmazása egyre szélesebb körű. A robotika területeiről a légi-, és a felszíni kutatórobotok alkalmazása már széleskörű, mindazonáltal a jelenlegi alkalmazási területeken kívül számos új alkalmazási terület is nyílik, amelyek, a teljesség igénye nélkül, az alábbiak:

1. klímaváltozás kutatási, monitoring feladatok ellátása légi felderítés segítségével;
2. belvízvédelem, árvízvédelem területén légi felderítés;
3. adatgyűjtés kárfelméréshez;
4. természeti katasztrófák következményeinek felmérése;
5. ipari katasztrófák következményeinek felderítése: vegyi-, biológiai-, és radiológia légi felderítés;
6. városi légi felderítő alkalmazások;
7. felszíni felderítő feladatok ellátása;
8. veszélyes területek megközelítése, és adatgyűjtés;
9. biztonsági kérdések megoldása;
10. kritikus infrastruktúra védelme.

2. SZAKIRODALOM RÖVID ÁTTEKINTÉSE

A légi járművek térbeli mozgásának matematikai modellezésével az [1, 2] irodalmak foglalkoznak. Pokorádi művében részletesen mutatja be a matematikai-, és a fizikai

 MAGYARORSZÁG MEGÚJUL	TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)
 A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.	

modellalkotás folyamatát, és a matematikai modellek bizonytalanságait [3]. Multitrotoros légi járművek mozgásának modellezésével a [4, 5, 12, 16] irodalmak foglalkoznak részletesen, és megadják az állapotterez rendszerdinamikai modelleket. Pilóta nélküli repülőgépek alkalmazásával a [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 20] irodalmak foglalkoznak. A [15] irodalom bemutatja a quadrotorok dinamikus mozgásegyenleteit. A [14, 17] cikkekben a szerző az UAV térbeli mozgásának identifikációjával foglalkozik. A [23] cikkben a szerző quadrotorok térbeli mozgásának matematikai modelljét vezette le.

3. MULTITROTOROS LÉGIJÁRMŰVEK ALKALMAZÁSA „TISZTA”, ÉS „EC_D3”⁸ REPÜLÉSI FELADATOKRA

3.1. Quadrotorok alkalmazása „tisztá” feladatokra

A multitrotoros repülőeszközök jól használhatóak a kis repülési sebességű, kis magasságú felderítő repülések esetén, mint például [6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 20]:

1. ipari létesítmények (pl. gyárak, üzemek, közlekedési infrastruktúra stb.), veszélyes üzemek (pl. vegyi üzemek, erőművek, atomerőművek, kritikus infrastruktúra stb.) monitoring vizsgálata;
2. mezőgazdasági termőterületek, növényi kultúrák, erdők szennyezettségének, és biológiai állapotának vizsgálata;
3. hálózatok (pl. villamos-energia hálózat, kőolaj-vezetékek, gázvezetékek, közlekedési (út-, vasút) hálózatok, telekommunikációs vezetékek stb.) állapotának vizsgálata;
4. vízügyi helyzet monitoring vizsgálata; árterek, gátak megfigyelése;
5. városi alkalmazások (stadionok megfigyelése, közlekedési forgalmi szituációk megfigyelés);
6. határőrizeti tevékenység támogatása.

A fenti felsorolás sem teljes, hiszen folyamatosan jelennek meg új igények, különféle új információk megszerzésére, új feladatok végrehajtására. Ily módon, a repülő fedélzeti szenzorok, és a fedélzeti elektronika is oly módon, folyamatosan újul meg, hogy képes legyen kielégíteni a felhasználói igényeket. A hobbi-repülési eszközök folyamatosan alakulnak át hordozó platformmá, és a legújabb elektronikai eszközök fedélzetre történő integrálásával új távlatok nyílnak a távérzékelésben, az adatfeldolgozásban, célazonosításban, és más területeken is.

⁸ EC_D3: Extra Cheap_D3

3.2. Quadrotorok alkalmazása „EC_D3” feladatokra

Az UAV alkalmazások során, sokszor ún. „D3”, azaz (Dirty-Dull-Dangerous) repüléseket kell végrehajtani. Mikor mondhatjuk egy repülési feladatra, hogy az „D3” tulajdonságokkal bír? A *Dirty* repülési feladat fogalmát még nem írták le szakirodalmak, ezért az alábbiakban egy sajátos, általam javasolt definíciót adok közre [23].

Egy repülési feladat *Dirty*, ha

- fizikailag szennyezett területek felett hajtjuk végre (pl. ipari katasztrófák, atomerőművek, természeti katasztrófák, közlekedési balesetek, árvizek, belvizes területek);
- bizonyos érdekeket sértő, de ugyanakkor legális repülések során (pl. éjszakai felderítése feladat, városi alkalmazások; középületek (bevásárló központok, stadionok, pályaudvarok) monitoringja; közterületek monitoringja) adatgyűjtést végzünk;
- UAV-alkalmazások a szórakoztató-, szabadidős-, és szállodaipar területén: hosszú óceáni, vagy tengeri partszakaszokon eltévedt turisták, gyerekek megkeresése;
- katonai alkalmazások felderítési céllal (célazonosítás, célkövetés, tűzvezetés stb.);
- UAVk harcászati alkalmazása (fedélzeti fegyverek alkalmazása).

A fenti felsorolás a leggyakrabban előforduló, tipikus eseteket sorolja fel, ami nem végleges: új elemek jelenhetnek meg az egyes sajátos repülési eljárásokban, módszerekben, a repülés megtervezésében, és a repülési feladatok meghatározásában [23].

Egy repülési feladat *Dull*, ha

- a repülés hosszú idejű;
- a kezelőszemélyzet számára unalmas, egyhangú, és gyakorlatilag rutinszerű, eseménytelen repüléseket kell végrehajtani.

Egy repülési feladat *Dangerous*, ha

- a repüléseket *Dirty* körülmények között (pl. természeti, vagy ipari katasztrófák, árvizek, belvizes területek) kell végrehajtani, ezért az UAV leszállása, esetleg kényszerleszállása olyan területeken történik, hogy elveszíthetjük a repülőeszközt, vagy olyan károsodásokat szenvedhet, amelyek rövidebb, vagy hosszabb időre, repülésre alkalmatlanná teszik az UAVt;

- repülések olyan domborzati viszonyok között (közép-, illetve magashegység), ahol a nem tervezett leszállások során károsodást szenvedhet az UAV, esetleg teljesen össze is törhet, vagy az is előfordulhat, hogy nem találjuk meg a leszállás helyén;
- erdőtűzek, láptűzek, bozótűzek monitoringja;
- katonai alkalmazások felderítési céllal (célazonosítás, célkövetés, tűzvezetés stb.), amikor számolni kell a repülőgép elvesztésével, vagy sérülésével;
- UAVk harcászati alkalmazása (fedélzeti fegyverek alkalmazása).

Számos repülési feladat végrehajtásakor, sajnos, számolnunk kell a repülőeszköz esetleges sérülésével, extrém esetben, a repülőgép elvesztésével, ezért a gyakorlatban sokszor olyan technológiákat, olyan eszközöket használnak, amelyek nem jelentenek túlzottan nagy anyagi veszteséget, egy UAV-ra számítva. Az ily módon tervezett légi járművek „EC_D3” jellemzővel bírnak: a repülések során akár el is veszíthetjük őket, esetleg, nem is törekszünk a sikeres leszállás végrehajtására az adott repülőgép típussal, mert nincsenek meg a leszállás feltételei (pl. hadszíntéri, éjszakai repülések magashegyi körülmények között, rossz időjárási viszonyok mellett) [23].

4. A QUADROTOROK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK DINAMIKUS MODELLJE

A négyrotoros UAV dinamikus viselkedését vizsgáljuk az 1. ábrán [23]. A Quadrotor sajátos aerodinamikai elrendezést jelent: a tartószerkezet végein elhelyezett villamos motorok közvetlenül hajtják a légcsavarokat, amelyek beállítási szöge nem változtatható. A motorok fordulatszáma egyenként is változtatható ebben az elrendezésben, így a négyrotoros légi jármű helyből felszálló, VTOL⁹-képesekkel rendelkezik, valamint jó kormányozhatósági-, és irányíthatósági jellemzőkkel bír. Az 1. ábra alapján könnyen belátható, hogy az egyes tengelyeken elhelyezett motorok azonos irányban, vagy az óramutató járásával azonos, vagy azzal ellentétes irányban forognak, így az eredő reaktív nyomaték hatását sikerül kiküszöbölni [23].

A függés repülési helyzetben mind a négy motor fordulatszáma azonos. Értelemszerű, hogy a függőleges tengely mentén a manőverezést a négy motor fordulatszámának azonos mértékű, és azonos irányú megváltoztatásával tudjuk elérni. A bólintás, és a megfelelő oldalirányú mozgás létrehozására az 1, és a 3 motorok fordulatszámát ellentétes értelemben kell megváltoztatni. A bedöntési szög, és a megfelelő oldalirányú mozgás létrehozása a 2, és a 4 motorok fordulatszámának ellentétes értelmű megváltoztatásával lehetséges. A legyező szög megváltoztatásához az egyes tengelyeken elhelyezett motorok fordulatszámának azonos, de a

⁹ VTOL: Vertical Take-off and Landing

másik tengelyen elhelyezett motorokkal ellentétes értelmű megváltoztatása szükséges: így a reaktív nyomaték kiegyensúlyozatlansága miatt a quadrotor elfordul a függőleges tengely körül.

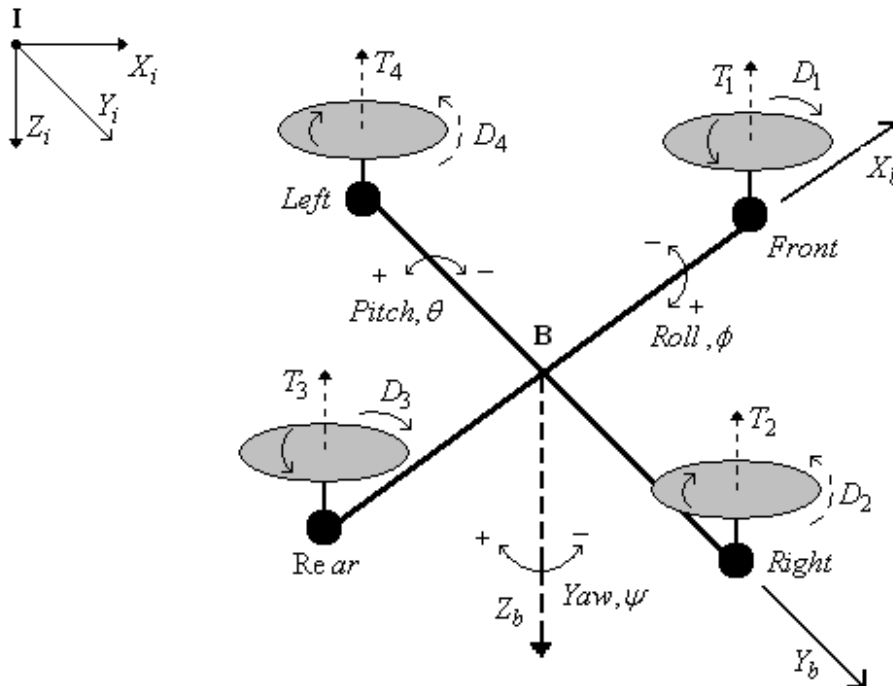
Az 1. ábrán **I** jelöli az inercia(vonatkoztatási) rendszert, míg **B** jelöli a légi járműhöz rögzített „test” koordináta-rendszert. A légi jármű „test” koordináta-rendszerben mért Euler-szögeinek változási sebessége az alábbi módon írható fel [1, 2, 12, 17, 23]:

$$[\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T = \mathbf{M}^{-1} [\omega_{x_i} \quad \omega_{y_i} \quad \omega_{z_i}]^T = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} [\omega_{x_b} \quad \omega_{y_b} \quad \omega_{z_b}]^T, \quad (4.1)$$

ahol: ϕ bedöntési szög; θ bólintási szög; ψ irányyszög; ω_{x_i} szögsebességek az inercia-rendszerben; ω_{x_b} szögsebességek a „test” koordináta rendszerben; valamint:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{c\psi}{c\theta} & \frac{s\psi}{c\theta} & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi - s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} - \text{forgatómátrixok,}$$

ahol: $c = \cos$, $s = \sin$.



1. ábra. A négyrotoros UAV dinamikus viselkedése.

Tekintettel arra, hogy számunkra a későbbi feladatok megoldása miatt csak a „test” koordináta-rendszer **B** pontjának a sebessége a szabályozandó paraméter, ezért a „test” koordináta-rendszerben mért sebességeket az alábbi egyenlettel határozhatjuk meg [23]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b & \dot{y}_b & \dot{z}_b \end{bmatrix}^T = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_i & \dot{y}_i & \dot{z}_i \end{bmatrix}^T, \quad (4.2)$$

ahol x_b, y_b, z_b koordináták a test-koordináta rendszerben, és x_i, y_i, z_i koordináták az inercia(referencia) koordináta rendszerben.

4.1 A quadrotor egyenesvonalú mozgásegyenletei

A mozgásegyenletek levezetése során feltételezzük, hogy

1. a quadrotor szerkezete merev, és szimmetrikus;
2. a quadrotor tömegközéppontja a **B** pontban helyezkedik el (l. 1. ábra);
3. a légszár-lapátok merev szerkezetek, és a quadrotor nem végez bólintó mozgást.

Az i -edik légszár-lapátok által létesített felhajtóerő arányos az adott légszár forgási sebességének négyzetével, vagyis [1, 2, 5, 6]:

$$T_i = C_1 \left(\frac{1 - 2\pi L C S}{P \alpha_i} + 2\pi \frac{\dot{z}_b - w_{z_b}}{P \alpha_i} \right), \quad (4.3)$$

ahol: $C_1 = k_t \rho A_p \alpha_i^2 R_p^2$; k_t aerodinamikai felhajtóerő tényező; ρ a levegő sűrűsége; A_p a légszár felülete; α_i az i -edik légszár szögsebessége; R_p a légszár sugara; L a légszár középpontjának távolsága az origótól; P a légszár-lapátok beállítási szöge, és végül, w_{z_b} a légköri turbulencia vektorának z -tengelyre eső vetülete. $C=1$, ha $i=1$, vagy $i=4$. $C=-1$, ha $i=2$, vagy $i=3$. $S = \omega_{y_b}$, ha $i=1$, vagy $i=3$. $S = \omega_{x_b}$, ha $i=2$, vagy $i=4$.

A légijármű hossz tengelye mentén ható erők eredője az alábbi egyenlettel írható le [5]:

$$F_{wl} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} k_s (w_{x_b} - \dot{x}_b) & k_s (w_{y_b} - \dot{y}_b) & k_u (w_{z_b} - \dot{z}_b) \end{bmatrix}^T, \quad (4.4)$$

ahol: k_s, k_u az egyenesvonalú mozgás súrlódási együtthatói; w_{x_b} és w_{y_b} a légköri turbulencia vektorának x - és y -tengelyekre eső vetületei, értelemszerűen.

A quadrotor térbeli lineáris mozgásának állapot-egyenlete a következő mátrixos alakban is megadható [12, 17, 23]:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \omega_{x_b} \\ \omega_{y_b} \\ \omega_{z_b} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{F_{wl}}{m} - \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{m} \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

ahol: g a nehézségi gyorsulás, m a légijármű tömege.

4.2 A quadrotor forgómozgásának egyenletei

Ismeretes, hogy a légsavarlapátok légellenállásból származó nyomatéka arányos a légsavarlapát forgási sebességének a négyzetével, vagyis [12, 17, 23]:

$$D_i = C_2 \left(\frac{1 - 2\pi LCS}{P\alpha_i} + 2\pi \frac{\dot{z}_b - w_{z_b}}{P\alpha_i} \right), \quad (4.6)$$

ahol: $C_2 = k_d \rho A_p \alpha_i^2 R_p^3$; k_d a nyomatéki együttható.

A légsavarlapátok eredő reakciónyomatéka az alábbi egyenlettel írható le:

$$I_{ct} = J_p (-\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_3 + \dot{\alpha}_4), \quad (4.7)$$

ahol: J_p egy légsavarlapát tehetetlenségi nyomatéka.

A súrlódási terhelő nyomatékot az alábbi egyenlet alapján is számíthatjuk:

$$\mathbf{M}_f = k_r [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T, \quad (4.8)$$

ahol: k_r a súrlódási együttható.

A légijármű motorjának forgórészére redukált nemirányítható zavarások (pl. légköri turbulencia) a következő összefüggéssel írható le:

$$\tau_d = [\tau_{x_b} \quad \tau_{y_b} \quad \tau_{z_b}]^T, \quad (4.9)$$

A légijármű giroszkópikus nyomatéka a következő egyenlettel írható le:

$$\mathbf{M}_g = J_p [\dot{\theta}\alpha \quad \dot{\phi}\alpha \quad 0]^T, \quad (4.10)$$

ahol: $\alpha = -\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4$.

Mindezek alapján, a quadrotor térbeli forgómozgásának állapot-egyenlete a következő mátrixos alakban is megadható [23]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{x_b} \\ \dot{\omega}_{y_b} \\ \dot{\omega}_{z_b} \end{bmatrix} = -J^{-1} \omega \times J \begin{bmatrix} \omega_{x_b} \\ \omega_{y_b} \\ \omega_{z_b} \end{bmatrix} - J^{-1} (\mathbf{M}_f + \tau_d + \mathbf{M}_g) + J^{-1} \begin{bmatrix} L(T_4 - T_2) \\ L(T_1 - T_3) \\ D_1 - D_2 + D_3 - D_4 + I_{ct} \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

ahol: $\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{z_b} & \omega_{y_b} \\ \omega_{z_b} & 0 & -\omega_{x_b} \\ -\omega_{y_b} & \omega_{x_b} & 0 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix}$ a főtehetetlenségi mátrix; J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} a

hossz-, a kereszt-, és a függőleges tengelyre vett főtehetetlenségi nyomatékok, értelemszerűen.

4.3 A quadrotor egyenáramú motorjának dinamikája

Ismeretes, hogy az egyenáramú motor – kis motor inductivitás esetén – dinamikus egyenlete a következő alakban írható fel:

$$J_p \dot{\alpha}_i = G \tau_{m_i} - D_i, \quad (4.12)$$

ahol: $\tau_{m_i} = \frac{k_i(V_i - k_v \alpha_i)}{R}$ a motor dinamikus gyorsító nyomatéka; k_i a motor állandója; k_v a motor forgási sebesség állandója; V_i a motor vezérlő feszültsége; R a motorellenállás; G a motor-légcsavar rendszer áttételi száma.

Vizsgáljuk kismagasságú függés repülési helyzetben a quadrotor dinamikáját, ha a függőleges tengely mentén kell emelkedő mozgást végrehajtania. A kiindulási feltételek – zavarásmentes esetre – most az alábbiak lesznek:

$$\theta = 0^\circ; \phi = 0^\circ; \psi = 0^\circ; v_{x_{b0}} = 0 \text{ m/s}; v_{y_{b0}} = 0 \text{ m/s}; v_{z_{b0}} = 0 \text{ m/s}, \quad (4.13)$$

A (4.1)–(4.5) egyenleteket felhasználva, a (4.13) kezdeti feltételek figyelembe vételével a quadrotor függőleges tengely mentén végrehajtott mozgásának dinamikus egyenlete az alábbi alakban írható fel:

$$\ddot{z}_b = \frac{F_{ml}}{m} - \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{m} + g, \quad (4.14)$$

vagy más alakban:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} = g - \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{m} = g - \frac{4T}{m}, \quad (4.15)$$

Az egyes rotorlapátok felhajtóereje az alábbi egyenlettel adható meg:

$$T = C_1 \left(\frac{1}{P \alpha_i} + 2\pi \frac{\dot{z}_b}{P \alpha_i} \right), \quad (4.16)$$

ahol: $C_1 = k_i \rho A_p \alpha_i^2 R_p^2 = 4,15872 \cdot 10^{-6} \alpha_i^2$.

Helyettesítsük be a (4.16) egyenletet a (4.15) egyenletbe:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} = g - \frac{4T}{m} = g - \frac{4}{m} C_1 \left(\frac{1}{P\alpha_i} + 2\pi \frac{\dot{z}_b}{P\alpha_i} \right), \quad (4.17)$$

és rendezzük a kapott egyenletet:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} + \frac{4}{m} C_1 2\pi \frac{\dot{z}_b}{P\alpha_i} = g - \frac{4}{m} C_1 \frac{1}{P\alpha_i}, \quad (4.18)$$

valamint további rendezéssel a következő összefüggésre jutunk [23]:

$$\ddot{z}_b + \dot{z}_b \left(\frac{1}{m} + \frac{4}{m} C_1 2\pi \frac{1}{P\alpha_i} \right) = g - \frac{4}{m} C_1 \frac{1}{P\alpha_i}. \quad (4.19)$$

Egy hipotetikus quadrotor paramétereinek felhasználásával a (4.19) egyenlet a következő alakban írható fel [23]:

$$\ddot{z}_b + \dot{z}_b (0,222568 + 153,0451369 \cdot 10^{-6} \alpha_i) = 9,81 - 24,35789 \cdot 10^{-6} \alpha_i. \quad (4.20)$$

Legyen $\alpha_i = 1000 \text{ ford} / p$. Akkor a függőleges sebesség változását az alábbi egyenlet adja meg:

$$\dot{v}_b + v_b 153,2677049 = 9,81 - 24,35789 \Delta \alpha_i. \quad (4.21)$$

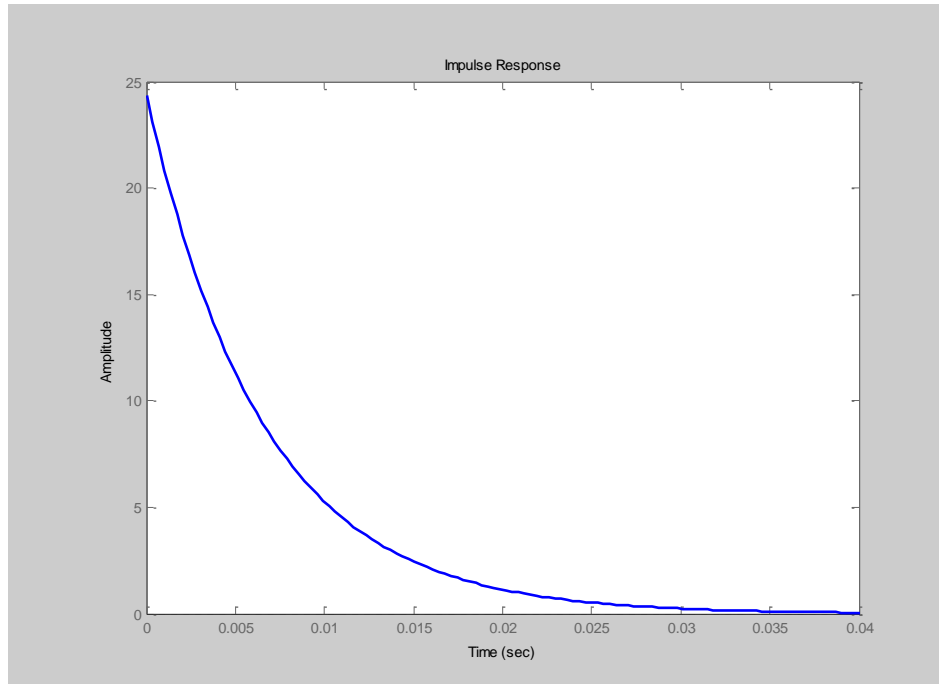
A (4.21) egyenlet alapján a quadrotor átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y(s) = \frac{v_b(s)}{\Delta \alpha_i(s)} = - \frac{24,35789}{153,2677049 + s}. \quad (4.22)$$

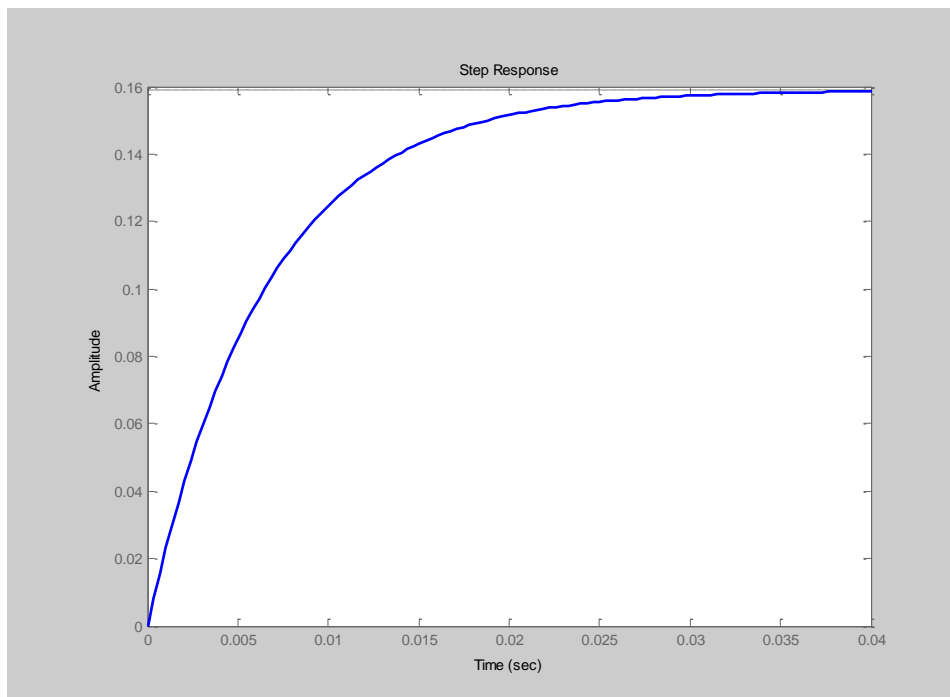
A továbbiakban vizsgáljuk meg a quadrotor viselkedését idő-, és frekvenciatartományban. A számítógépes szimuláció eredménye a 2. ábrán látható.

A 2. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a quadrotor gyorsan reagál a bemenetekre, képes nagy sebességgel reagálni a gerjesztő jelre, és állandó sebességgel emelkedni (2.b. ábra).

A súlyfüggvény állandósult állapotban zérushoz tart, így az irányított quadrotor stabilis viselkedésű.



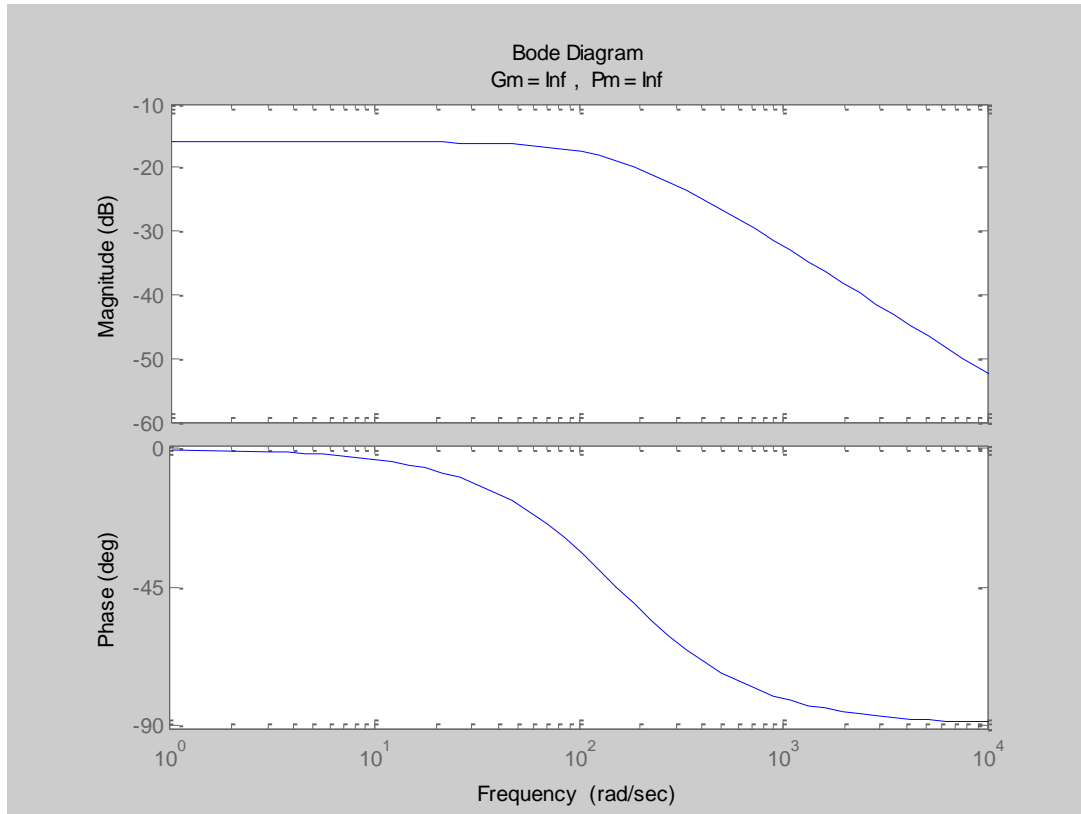
a) Súlyfüggvény



b) Átmeneti függvény

2. ábra Tranziens analízis eredménye

A 3. ábrán a quadrotor frekvenciatartománybeli viselkedése látható. A 3. ábrán jól látható, hogy a quadrotor aluláteresztő jelleggel viselkedik, nagyfrekvenciás tartományban „levágja” a bemeneti jeleket, jól szűri a nagyfrekvenciás zajokat. Úgy az erősítési-, mint a fázistartalék végtelen értékű.



3. ábra Viselkedés frekvenciatartományban – Bode diagram.

5. LQ-ALAPÚ SZABÁLYOZÓTERVEZÉS QUADROTOR FÜGGŐLEGES TÉRBELI MOZGÁSÁNAK AUTOMATIZÁLÁSA

Lineáris, autonóm szabályozási rendszer állapot-, és a kimeneti egyenletet az alábbi alakban szokás megadni [1, 2]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}; \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}, \quad (5.1)$$

ahol: \mathbf{x} állapotvektor, \mathbf{u} bemeneti vektor, \mathbf{y} kimeneti vektor, \mathbf{A} állapotmátrix, \mathbf{B} bemeneti mátrix, \mathbf{C} kimeneti mátrix és \mathbf{D} segédmátrix.

Többváltozós állandó paraméterű irányított rendszer esetében a minimálandó funkcionált az alábbi egyenlettel szokás megadni [1, 2]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \rightarrow \text{Min}, \quad (5.2)$$

ahol : \mathbf{Q} pozitív definit (vagy pozitív szemidefinit) diagonális súlyozó mátrix, \mathbf{R} pozitív definit diagonális súlyozó mátrix.

Az integrálandó $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$ kvadratikus alak a minőségi jellemzőkről hordoz információt, míg az $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$ kvadratikus alak a költségeket jellemzi [1, 2].

Ezek a tagok skalár mennyiségek, mivel:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = [x_1 \quad \dots \quad x_n] \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & q_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = [x_1 \quad \dots \quad x_n] \begin{bmatrix} q_1 x_1 \\ \dots \\ q_n x_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n q_i x_i^2(t), \quad (5.3)$$

valamint

$$\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} = [u_1 \quad \dots \quad u_n] \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & r_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = [u_1 \quad \dots \quad u_n] \begin{bmatrix} r_1 u_1 \\ \dots \\ r_n u_n \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n r_j u_j^2(t), \quad (5.4)$$

Az (5.3) és az (5.4) egyenletek alapján azt mondhatjuk, hogy az (5.2) integrálkritérium az $x_i^2(t)$ és az $u_j^2(t)$ görbék alatti területet minimalja.

5.1 Az elfajult Ricatti-féle mátrixegyenlet

Tekintsük adottnak a vizsgált rendszer állapotegyenletét [1, 2]:

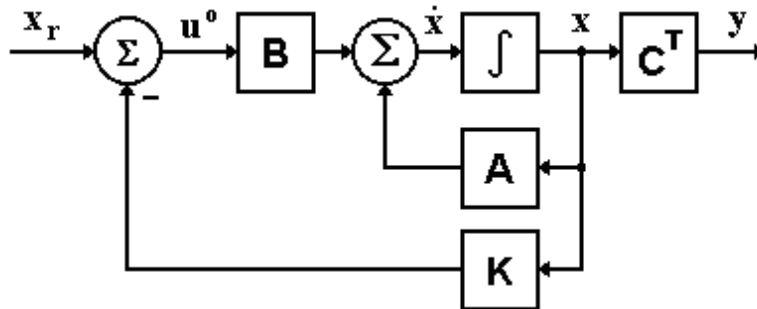
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}. \quad (5.5)$$

Az optimális vezérlési törvény:

$$\mathbf{u}^0(t) = -\mathbf{K} \mathbf{x}(t) \quad (5.6)$$

alakú, amely biztosítja az (5.2) négyzetes integrálkritérium minimális értékét. Az optimálási feladat megoldottnak tekinthető bármely $\mathbf{x}(0)$ kezdeti értékre, ha ismertek a \mathbf{K} mátrix elemei.

Az optimális szabályozási rendszer hatásvázlata a 4. ábrán látható. A referencia jel legyen zérusértékű, vagyis, $x_r(t) = 0$.



4. ábra. A teljes állapot-visszacsatolású rendszer hatásvázlata.

Helyettesítsük az (5.6) egyenletet az (5.5) állapotegyenletbe. A következő egyenletet kapjuk:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K}) \mathbf{x}. \quad (5.7)$$

A továbbiakban feltételezzük, hogy az $(\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K})$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek. Helyettesítsük az (5.7) egyenletet az (5.2) egyenletbe. A következő egyenletet kapjuk:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K} \mathbf{x}) dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x} dt \rightarrow \text{Min}. \quad (5.8)$$

Az (5.2) integrálkritérium minimalálásához Ljapunov második, közvetlen módszerét használjuk fel. Feltételezzük, hogy bármely \mathbf{x} állapotvektorhoz rendelhető egy valós elemű \mathbf{P} pozitív definit Hermite - féle hermetikus mátrix, amelyre igaz, hogy $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$. Ebben az esetben igaz a következő egyenlet [1]:

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x} = - \frac{d}{dt} (\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}). \quad (5.9)$$

Az $\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ kvadratikus alak deriválása és az (5.9) egyenlet felhasználása után kapjuk, hogy:

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x} = - \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{x} = - \mathbf{x}^T [(\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K})^T \mathbf{P} + \mathbf{P} (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K})] \mathbf{x}. \quad (5.10)$$

Ljapunov második közvetlen módszere szerint, ha az $(\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K})$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek, akkor $\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}$ pozitív definit mátrix esetén létezik olyan pozitív definit \mathbf{P} mátrix, amelyre igaz, hogy:

$$(\mathbf{A} - \mathbf{BK})^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{BK}) = -(\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}). \quad (5.11)$$

Az (5.11) egyenletet szokás Ljapunov-féle mátrix egyenletnek nevezni. A négyzetes integrálkritérium most a következő alakban adható meg:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x} dt = - \left[\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \right]_0^{\infty} = -\mathbf{x}^T(\infty) \mathbf{P} \mathbf{x}(\infty) + \mathbf{x}^T(0) \mathbf{P} \mathbf{x}(0). \quad (5.12)$$

Mivel az $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek, ezért $\mathbf{x}(\infty) \rightarrow 0$. Az (5.12) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$J = \mathbf{x}^T(0) \mathbf{P} \mathbf{x}(0). \quad (5.13)$$

Mint az (5.13) egyenletből látszik, az (5.12) integrálkritérium függ az $\mathbf{x}(0)$ kezdeti feltételtől is. Korábban ismeretes, hogy az \mathbf{R} mátrix valós elemű pozitív definit Hermite-féle hermetikus mátrix, ezért igaz, hogy:

$$\mathbf{R} = \mathbf{T}^T \mathbf{T}. \quad (5.14)$$

ahol \mathbf{T} nonszinguláris (reguláris) mátrix.

Az (5.14) egyenlet figyelembevételével az (5.11) egyenletet a következő módon írhatjuk fel:

$$(\mathbf{A}^T - \mathbf{K}^T \mathbf{B}^T) \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{BK}) + \mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} = 0. \quad (5.15)$$

Elvégezve az (5.15) egyenlet a kijelölt műveleteit, kapjuk, hogy:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + (-\mathbf{K}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{K} + \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K}) + \mathbf{Q} = 0. \quad (5.16)$$

Felhasználva, hogy $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$, valamint $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1}$, a zárójelben álló kifejezés tovább alakítható:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} - \mathbf{K}^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{K} &= \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} - \mathbf{K}^T \left[\mathbf{T}^T (\mathbf{T}^T)^{-1} \right] \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{K} + (\mathbf{P}^T - \mathbf{P}) \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \\ &= \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} - \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}^T \mathbf{B} (\mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}) \mathbf{K} + \mathbf{P}^T \mathbf{B} \left[\mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1} \right] \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \\ &= \left[\mathbf{K}^T \mathbf{T}^T - \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{T}^{-1} \right] \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \\ &= \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right]^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \end{aligned} \quad (5.17)$$



Az (5.16) egyenlet most az alábbi módon írható fel:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right]^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (5.18)$$

A négyzetes integrálkritérium minimalása, vagyis az optimális vezérlési törvény \mathbf{K} visszavezetési mátrixának meghatározása az

$$\mathbf{x}^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right]^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] \mathbf{x} \quad (5.19)$$

szorzat minimalását jelenti. Mivel az (5.19) mátrix nem negatív, ezért az (5.18) egyenlet minimális értéket akkor vesz fel, ha

$$\mathbf{T} \mathbf{K} = (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}. \quad (5.20)$$

Az (5.20) egyenletből fejezzük ki a \mathbf{K} visszacsatolási mátrixot:

$$\mathbf{K}^0 = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}. \quad (5.21)$$

Az (5.17) egyenlet definiálja az optimális \mathbf{K} visszacsatolási mátrixot. Az optimális vezérlési törvény:

$$\mathbf{u}^0(t) = -\mathbf{K}^0 \mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t). \quad (5.22)$$

A \mathbf{P} mátrix megállapítására gyakran alkalmazzák az ún. elfajult Ricatti algebrai mátrixegyenletet:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (5.23)$$

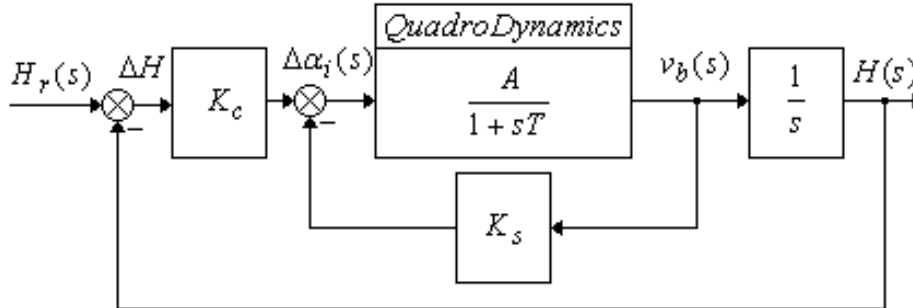
Az eddig elhangzottak alapján megfogalmazhatjuk az LQR optimalisasi feladat megoldásának lépéseit:

- 1, Az (5.23) egyenlet alapján meghatározzák a \mathbf{P} pozitív definit költség (Ljapunov) mátrixot;
- 2, A kapott \mathbf{P} mátrixot behelyettesítik az (5.22) egyenletbe. A \mathbf{K} visszacsatolási mátrix optimális, az optimális vezérlési törvényt az (5.22) egyenlet definiálja.

A \mathbf{K} optimális visszacsatolási mátrix számítását a MATLAB program Control System Toolbox programjának az *lqr.m*, vagy *lqr2.m* függvénye támogatja [25, 26].

5.2 Quadrotor magasságstabilizáló rendszere szabályozójának előzetes tervezése

A quadrotor magasságstabilizáló rendszere az 5. ábrán látható.



5. ábra. A magasságstabilizáló rendszer hatásvázlata.

Az 5. ábra alapján írjuk fel a szabályozási rendszer állapot-egyenletét.

$$v_b(s) = \frac{A}{1+sT} \Delta\alpha_i(s) \rightarrow \dot{v}_b(t) = -\frac{v_b(t)}{T} + \frac{A}{T} \Delta\alpha_i(t) \quad (5.24)$$

$$H(s) = \frac{1}{s} v_b(s) \rightarrow \dot{H}(t) = v_b(t) \quad (5.25)$$

Az (5.24)-(5.25) egyenletek alapján a rendszer állapotegyenlete a következő mátrixos alakban írható fel:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{v}_b(t) \\ \dot{H}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b(t) \\ H(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A/T \\ 0 \end{bmatrix} \Delta\alpha_i(t) \quad (5.26)$$

A nemirányított quadrotor átmeneti függvénye a 6. ábrán látható. A zárt szabályozási rendszer vezérlési törvénye az alábbi egyenlettel adható meg:

$$\mathbf{u}(t) = \Delta\alpha_i(t) = -H(t)K_c - v_b(t)K_s = -\mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (5.27)$$

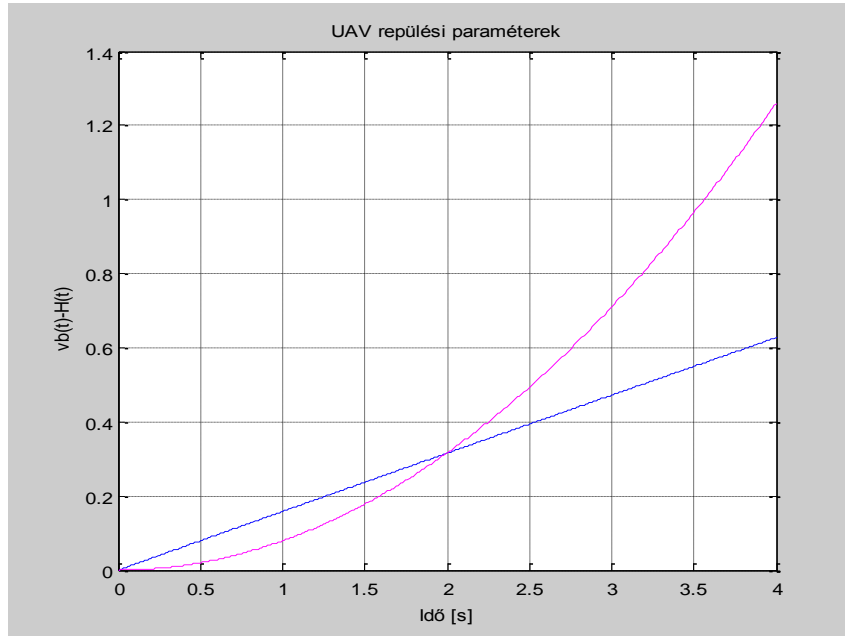
ahol: $\mathbf{x} = [v_b \quad H]^T$ - állapot-vektor; $\mathbf{K} = [K_c \quad K_s]$ - teljes állapot-visszacsatolási mátrix.

Tervezzük meg az optimális állapot-visszacsatolási mátrixot az alábbi, un. egységnyi, azonos súlyozás elvén meghatározott súlyozó mátrixok esetén:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; r_1 = 1. \quad (5.28)$$

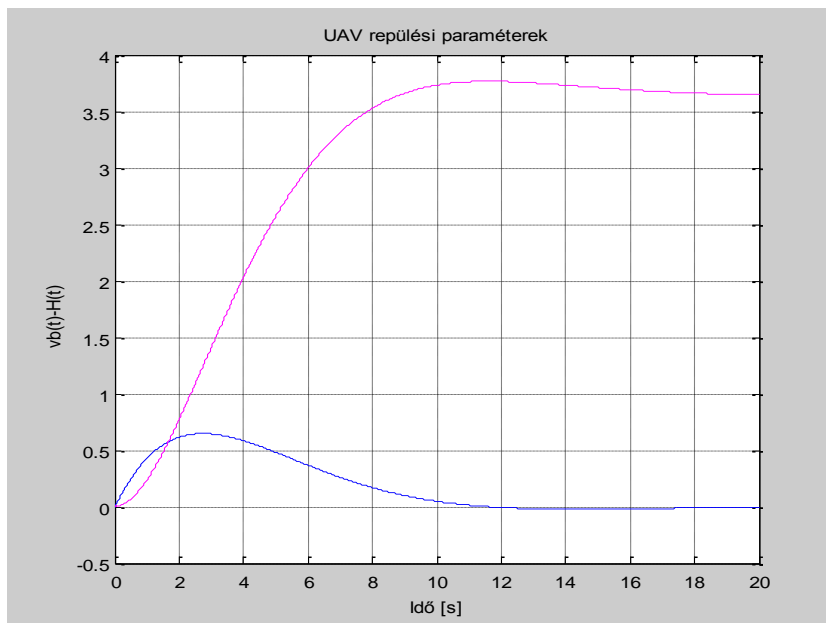
A teljes állapot-visszacsatolási mátrix most a következő lesz [25, 26]:

$$\mathbf{K}_1 = [\mathbf{K}_c \quad \mathbf{K}_s] = [3,6449 \quad 1], \quad (5.29)$$



6. ábra. Nemirányított UAV átmeneti függvények
Függőleges repülési sebesség Repülési magasság

A zárt szabályozási rendszer átmeneti függvénye a $H_r(t)=1(t)$ bemeneti jelre az (5.28) súlyozás esetén a 7. ábrán látható.



7. ábra. UAV zárt szabályozási rendszer átmeneti függvényei
Függőleges repülési sebesség Repülési magasság

A zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői az alábbiak lesznek:

Sajátértékek	Csillapítási tényező, ξ	Körfrekvencia, [rad/s]
$-0,293 \pm 0,27i$	0,735	0,399

A 7. ábrán jól látható, hogy az egységnyi bemeneti jelre adott válasz stacioner értéke $H(\infty) \approx 3,7m$, tehát az ideális alapjel követés nem valósul meg. A zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői nem felelnek meg az előírt értékeknek [27], bár meg kell jegyezni, hogy a hivatkozott katonai szabvány az ember vezette légijárművekre vonatkozik.

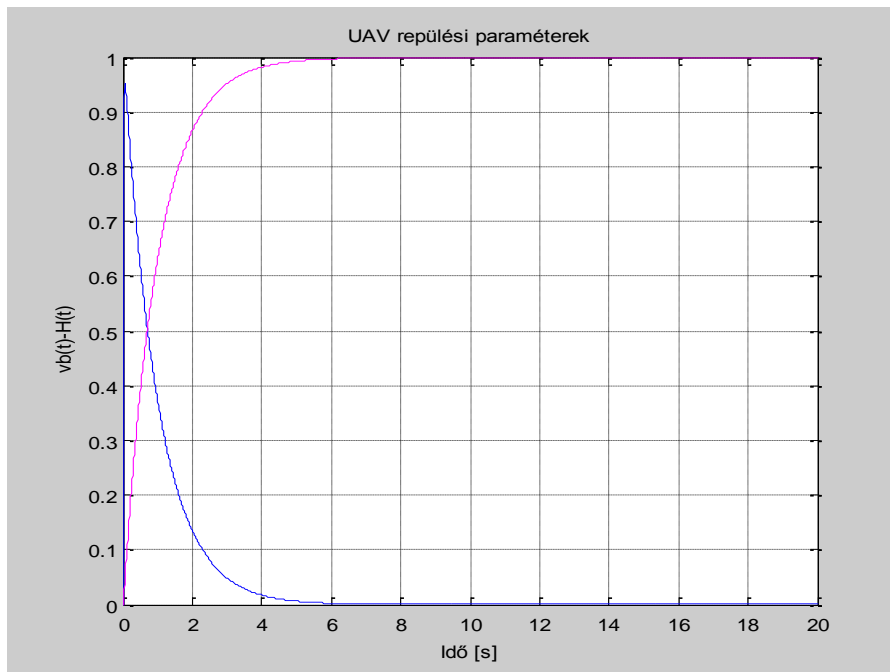
Hangoljuk az (5.28) súlyozó mátrixokat heurisztikusan. A zárt szabályozási rendszer előírt minőségi jellemzőit teljesítő súlyozó mátrix-kombináció a következő lesz:

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} 0,98 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; r_2 = 0,000006 . \quad (5.30)$$

Az (5.30) súlyozó mátrixok alapján határozzuk meg a teljes állapot-visszacatolási mátrixot:

$$\mathbf{K}_2 = [K_c \quad K_s] = [446,76 \quad 447,2], \quad (5.31)$$

A zárt szabályozási rendszer átmeneti függvénye a $H_r(t) = 1(t)$ bemeneti jelre az (5.30) súlyozó mátrixok esetére a 8. ábrán látható.



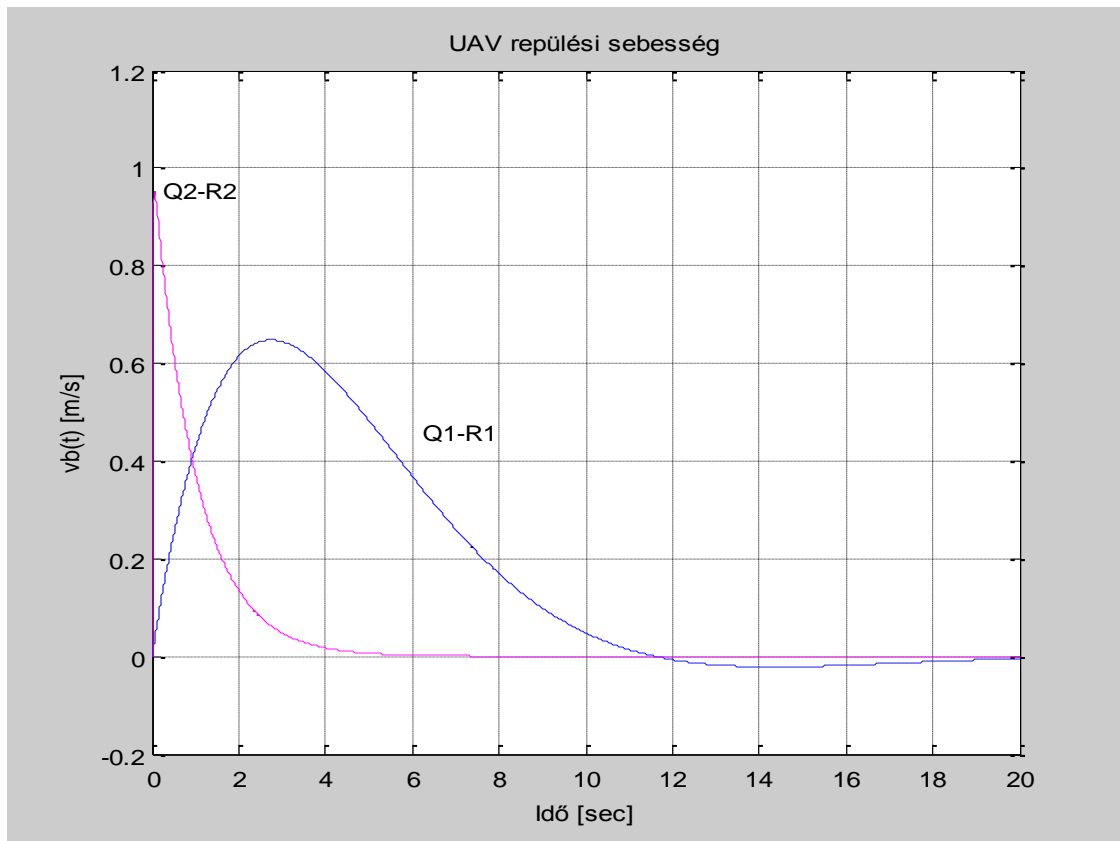
8. ábra. UAV zárt szabályozási rendszer átmeneti függvényei
Függőleges repülési sebesség Repülési magasság

A módosított zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői az alábbiak lesznek:

Sajátértékek	Csillapítási tényező, ξ	Körfrekvencia, [rad/s]
-70	1	70
-1,02	1	1,02

A 8. ábrán jól látható, hogy az egységnyi bemeneti jelre adott válasz stacioner értéke $H(\infty) = 1m$, tehát megvalósul az ideális alapjel követés. A zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői megfelelnek meg az előírt értékeknek [27].

Hasonlítsuk össze a két súlyozás alapján tervezett rendszer zárt szabályozási rendszer viselkedését. Az két rendszer megfelelő állapotváltozóit a különféle súlyozás alkalmazása esetére a 9. ábrán láthatjuk.



UAV függőleges repülési sebesség

Q1-R1 Q2-R2

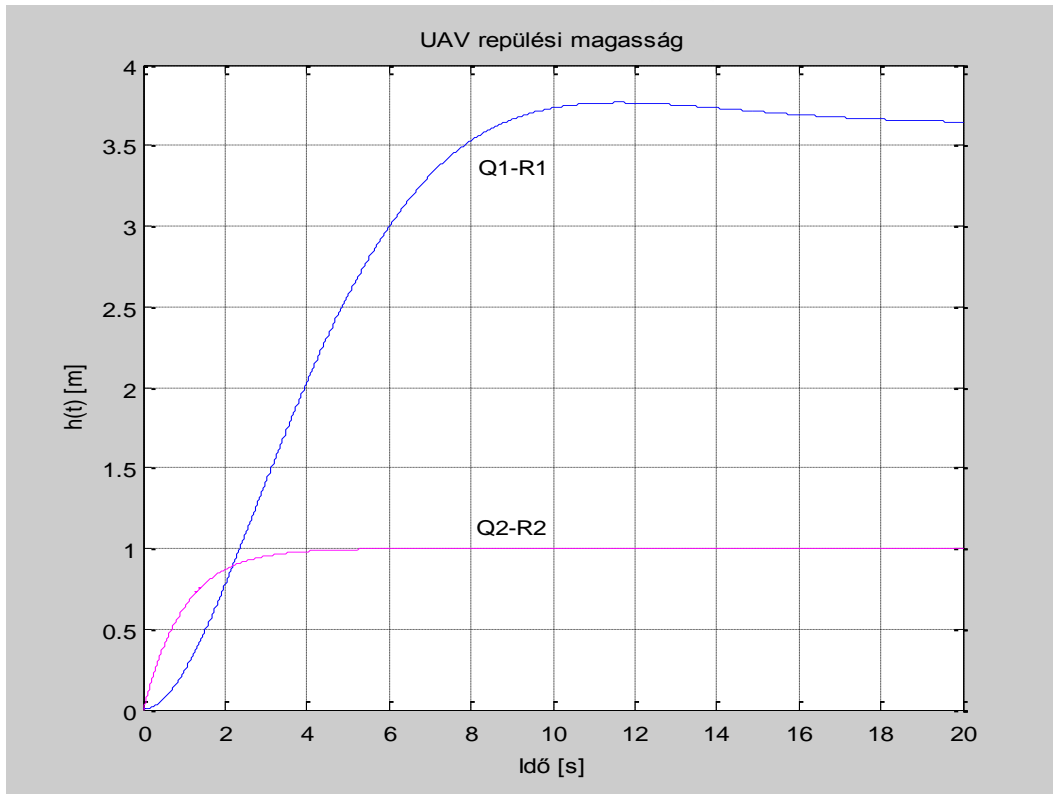


MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)



UAV repülési magasság
Q1-R1 Q2-R2

9. ábra. Az UAV zárt magasságstabilizáló rendszerének átmeneti függvényei.

A 9. ábrán jól látható, hogy az alapjel követés a $H_r(t)=1(t)$ bemeneti jelre megvalósul, és a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői is megfelelnek az előírt értékeknek [27].

6. ÖSSZEGLÉS

A pilóta nélküli repülőgépek széles körben használt eszközök számos katonai, és polgári alkalmazási területen. A fejezet a lehetséges UAVk közül a multirotoros (négyrotoros, quadrotor) UAV-ra korlátozódik, mivel e légijárművek kiválóan alkalmazhatóak műveleti területi felderítő repülések végrehajtására, valamint katasztrófavédelmi-, és egyéb más alkalmazások támogatására.

A szerző bemutatta a quadrotorok térbeli mozgásának matematikai modelljét, és az egyik, talán leginkább gyakori repülési üzemmóddal, a „függés” manőverrel foglalkozik. E manőverek során fő feladat a megadott repülési magasság tartása, és ebből a repülési helyzetből a magasság növelése, vagy csökkentése.

A repülési manőver optimális szabályozási rendszer segítségével is végrehajtható. Az LQR-feladat megoldására a szerző új súlyozást mutatott be, aminek révén olyan szabályozó tervezhető, amely biztosítja a zárt repülésszabályozó rendszer előírt minőségi jellemzőit.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A téma több új területet is felkínál vizsgálatra, melyek az alábbiak: további determinisztikus irányítási csatornák tervezése; a dinamikus szabályozó tervezése (az LQG feladat megoldása külső, és belső sztochasztikus zajok esetén); robusztus repülésszabályozó rendszer tervezése a H_2 -, és a H_∞ -módszerek segítségével.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MCLEAN, D., Automatic Flight Control Systems, Prentice-Hall International, New York-London-Toronto-Sydney-Tokyo-Singapore, 1990.
- [2] NELSON, L. C., Flight Stability and Control, McGraw-Hill Companies, Inc., Boston, Massachusetts, Burr Ridge, 1998.
- [3] POKORÁDI, L., Rendszerek és folyamatok modellezése, ISBN 978-963-9822-06-1, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.
- [4] TAYEBI, A., MCGILVRAY, S., Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 14., No 3, pp(562-571), 2006.
- [5] BOUADI, H., BOUCHOUCHA, M., TADJINE, M., Modelling and Stabilizing Control Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrotor, Engineering Letters, 15:2, EL_15_2_24 (Advance On-Line Publication: 17 November 2007).
- [6] SZABOLCSI, R., Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata, Elektronikus Műszaki Füzetek IV, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, p(59–65), Debrecen, 2007.
- [7] SZABOLCSI, R., Pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények vizsgálata – az „Alpha-csoport”, Elektronikus Műszaki Füzetek V, MTA Debreceni Területi Bizottság, Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottsága, p(23–33), Debrecen, 2008.
- [8] SZABOLCSI, R., MÉSZÁROS, GY., Pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények vizsgálata – a „Bravo-csoport”, „Repüléstudományi konferencia – 70 éves a Légierő”, Repüléstudományi Közlemények, különszám, ISSN 1789-770X, 2008. április 11, Szolnok.
- [9] SZABOLCSI, R., Egy felmérés margójára – néhány gondolat a pilóta nélküli repülőgépek polgári és katonai alkalmazásáról, Szolnoki Tudományos Közlemények XII., HU ISSN 2060-3002, 2008.
<http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2008/cikkek/szabolcsi-robert.pdf>
- [10] SZABOLCSI, R., Conceptual Design of Unmanned Aerial Vehicle Systems for Non-Military Applications, Proceedings of the 11th Mini Conference on Vehicle System

Dynamics, Identification and Anomalies VSDIA 2008, ISBN 978-963-313-011-7, pp (637-644), Budapest University of Technology and Economics, 10-12 November 2008, Budapest, Hungary.

- [11] SZABOLCSI, R., Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Systems Used for Military Applications, XVI. Magyar Repüléstudományi Napok tudományos konferencia kiadványa, ISBN 978-963-420-857-0, BME, 2008. november 13-14, Budapest.
- [12] GOEL, R., SHAH, S.M., GUPTA, N.K., ANANTHKRISHNAN, K., Modeling, Simulation, and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor, Proceedings of the 11th Centenary International Conference and Exhibition on Aerospace Engineering, ICEAE 2009, May 18-22, 2009 (<http://www.idearesearch.in/Papers/GN-070.pdf>. Letöltve: 2011. március 29.)
- [13] GOEL, R., SHAH, S.M., GUPTA, N.K., ANANTHKRISHNAN, K., Modeling, Simulation, and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor, Proceedings of the IISc Centenary International Conference and Exhibition on Aerospace Engineering, ICEAE 2009, May 18-22, 2009 (<http://www.idearesearch.in/Papers/GN-070.pdf>. Letöltve: 2011. március 29.)
- [14] SZABOLCSI, R., Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems Used for Military Applications, Scientific Bulletin of "Henri Coanda" Air Force Academy, No. 1/2009., ISSN 2067-0850, pp(61-68), Brasov, Romania.
- [15] SZABOLCSI, R., Identification of the UAV Mathematical Models, CD-ROM Proceedings of the VIth International Conference „New Challenges in the Field of Military Sciences, ISBN 978-963-87706-4-6, 18-19 November 2009, Budapest, Hungary.
- [16] NEČAS, P., CÎRCIU, I., ROTARU, C., BOȘCOIANU, M., An Analysis of the Stability and Performances of Rotary Wing Micro Aerial Vehicles, Review of the Air Force Academy, The Scientific Informative Review, N^o 1(16)/2010, Brasov, Romania.
- [17] LEE, T., LEOK, M., MCCLAMROCH, N.M., Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3), Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, pp(5420-5425), 15-17 December 2010, Atlanta, GA, USA.
- [18] SZABOLCSI, R., UAV Spatial Motion Model Identification, Repüléstudományi Közlemények, On-line folyóirat, 2010/2., Különszám, "Repüléstudományi Konferencia 2010 – 60 éves a szolnoki repülőtisztképzés" tudományos konferencia kiadványa, HU ISSN 1789-770X, 2010. április 16. (<http://www.szrfk.hu/rtk/index.html>).

- [19] SZABOLCSI, R., Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems for the Firefighter Applications, CD-ROM Proceedings of the 12th International Conference „AFASES 2010”, ISBN 978-973-8415-76-8, p4, 27-29 May 2010, Brasov, Romania.
- [20] SZABOLCSI, R., Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems for the Police Applications, CD-ROM Proceedings of the 12th International Conference „AFASES 2010”, ISBN 978-973-8415-76-8, p4, 27-29 May 2010, Brasov, Romania.
- [21] SZABOLCSI, R., Forgószárnyú és/vagy merevszárnyú UAV alkalmazások, Műszaki Füzetek, MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, Műszaki Szakbizottság, HU ISSN 2060-7954., Debrecen, 2010. (www.mfk.unideb.hu/mszb/muszfuz).
- [22] <http://www.gau.com.tw/>
- [23] SZABOLCSI, R., Multitrotoros légi járművek, repülésdinamikai modellje, és azok vizsgálata, Repüléstudományi Közlemények, 2011/2. szám, HU ISSN 1789-770X, „Véget ért a MiG-korszak” tudományos konferencia kiadványa, Szolnok, 2011. április 15. (<http://www.szrfk.hu/rtk/index.html>).
- [24] *MATLAB*[®] 7 (R2010b), Getting Started Guide, The MathWorks[™], Inc., 2009.
- [25] *Control System Toolbox* 8, Getting Started Guide, The MathWorks[™], Inc., 2008.
- [26] *MIL-STD 1797 A*, Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft, Department of Defense, Interface Standard, 2004.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

II. RÉSZ

UAV AUTOMATIKUS MAGASSÁGSTABILIZÁLÓ RENDSZER SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT ELŐZETES TERVEZÉSE

BEVEZETÉS

Az automatikus repülésszabályozás egyik alapvető feladata olyan szabályozás tervezése, amely biztosítja a repülési magasság állandó értéken tartását, vagy adott módon történő megváltoztatását is. A szabályozási feladat megoldása akkor tekinthető jó minőségűnek, ha az alapjel követése mellett a szabályozás megfelelő zavarvédelemmel is rendelkezik. A szabályozás minőségi követelményeit a MIL–F–8785C és a MIL–STD–1797A szabvány adja meg.

I. PROBLÉMAFELVETÉSE, MOTIVÁCIÓ

E fejezet I. Részében a szerző UAV számára javasolt a szerző optimális szabályozó beállításokat. Az optimális, LQR-feladat megoldásához a modern szabályozástechnikából jól ismert Ljapunov-módszert használta. E fejezet részben a szerző az UAV szabályozójának előzetes számítógépes tervezéséhez az Euler-Lagrange egyenletet, a Hamilton-Jacobi-Belmann-módszert, és a Pontrjagin-féle minimum-elvet alkalmazza a szerző.

II. ELŐZMÉNYEK, SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK RÖVID ÁTTEKINTÉSE

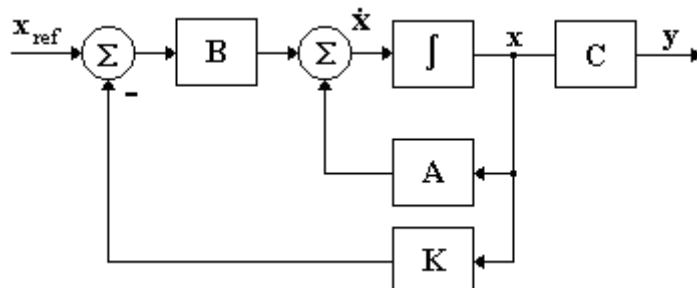
A modern szabályozástechnika állapotterez tárgyalási módszerét az [1, 2, 3, 5, 7] irodalmak foglalják össze. Eme források a II. Rész elmélet alapjait jelentik. Az automatikus repülésszabályozó rendszerek alkalmazását a [4, 5, 13, 16] források mutatják be. A légi járművek repülésdinamikai modelljeit a [6, 15] forrásokban találjuk. Az utóbbi években az automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezésében széles körben terjedt el a CAD-technológia használata, amint azt a [10, 11, 12, 13, 16, 17, 18] irodalmakban. Ismert néhány régebbi [8, 9], illetve újabb katonai szabvány, amelyek az automatikus repülésszabályozó rendszerek minőségével foglalkoznak [14, 19]. Tekintettel arra, hogy az UAVk számára a mai napig nem készült el minőségi szabványrendszer, így, bár szigorúbb minőségről beszélünk, az ember által vezetett légi járművek számára meghatározott minőségi követelményrendszert használunk majd. Az UAV matematikai modellje, és annak vizsgálata a [20] irodalomban található.

III. ZÁRT SZABÁLYOZÁSI RENDSZEREK TERVEZÉSE AZ LQR-MÓDSZERREL

A lineáris, többváltozós szabályozási rendszer dinamikája az alábbi egyenletekkel adott [6, 7, 10, 11, 12, 13, 16]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}, \quad (3.1)$$

ahol \mathbf{A} az állapotmátrix, \mathbf{B} a bemeneti mátrix, \mathbf{C} a kimeneti mátrix, és \mathbf{D} a közvetlen előrevezetési mátrix. A (3.1) egyenletek alapján felépített rendszervázlat a 3.1. ábrán látható, a $\mathbf{D}=0$ feltétel mellett.



3.1. Ábra. A többváltozós zárt szabályozási rendszer hatásvázlata.

Az optimális vezérlési törvényt a következő integrálkritérium minimalálásával határozzuk meg [10, 11, 12]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \rightarrow \text{Min}. \quad (3.2)$$

A (3.2) költségfüggvényben $\mathbf{Q} \geq 0$ pozitív semi-definit átlós, súlyozó mátrix, $\mathbf{R} > 0$ pozitív definit átlós, súlyozó mátrix. Ha $\mathbf{Q} \gg \mathbf{R}$, akkor a zár szabályozási rendszer nagy túlszabályozásokkal fog működni. Ellenkező esetben, a szabályozás kisebb méretű szabályozóval, és kisebb energiaigénnyel fog működni. A súlyozó mátrixok beállítására több módszer is ismert:

1. Azonos súlyozás elve, amikor a súlyozó mátrixok főátlóján egyes értékek állnak;
2. A reciprok-négyzetes szabály;
3. heurisztikus hangolás.

A determinisztikus LQ-optimális probléma megoldására – ahogyan említettük – a Hamilton-Jacobi-Belmann-módszert alkalmazzuk, kiegészítve az Euler-Lagrange egyenlettel, és a Pontrjagin-féle minimum-elvvel. A Hamilton-mátrix most a következő alakban adható meg:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, t) = \frac{1}{2} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}), \quad (3.3)$$

ahol $\boldsymbol{\lambda}$ a Lagrange-multiplikátor.

Pontryagin's minimum elvének megfelelően ismert, hogy az optimális állapot-, és vezérlő vektor trajektóriákra teljesül az alábbi egyenlet [7]:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \dot{\mathbf{x}}; \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{x}} = -\dot{\boldsymbol{\lambda}}; \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{u}} = 0. \quad (3.4)$$

Elvégezve a (3.4) egyenletben a differenciálásokat kapjuk, hogy:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_o, \quad (3.5)$$

$$-\dot{\boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{Qx} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda}(T) = 0, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{u}^o = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda}. \quad (3.7)$$

A (3.7) egyenlet definiálja a zárt szabályozási rendszer optimális vezérlési törvényét. A (3.5)-(3.7) egyenletrendszer az ún. rögzített végpontú, korlátozósos rendszerek egyenletei. Behelyettesítve a (3.7) egyenletet a (3.5) állapot-egyenletbe kapjuk, hogy:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{BR}^{-1} \mathbf{B}^T \\ -\mathbf{Q} & -\mathbf{A}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

A (3.8) egyenletben hajtsuk végre a következő helyettesítést:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Px}, \quad (3.9)$$

ahol \mathbf{P} az ún. költség(Ljapunov) mátrix. Deriválva a (3.9) egyenlet mindkét oldalát, és figyelembe véve a (3.6)-(3.8) egyenleteket kapjuk, hogy:

$$\frac{d\boldsymbol{\lambda}}{dt} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} \mathbf{x} + \mathbf{P} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} \mathbf{x} + \mathbf{PAx} - \mathbf{PBR}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Px} = -\mathbf{Qx} - \mathbf{A}^T \mathbf{Px}. \quad (3.10)$$

A \mathbf{P} költség(Ljapunov) mátrix eleget kell tegyen az alábbi Ricatti-féle differenciál-egyenletnek:

$$-\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{PA} + \mathbf{Q} - \mathbf{PBR}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}; \quad \mathbf{P}(T) = 0. \quad (3.11)$$

A Ricatti-egyenlet megoldásán alapuló optimális feladatmegoldás ún. végidő probléma. E megközelítésben, a lineáris, változó vezérlési törvény egyenlet most a következő lesz:

$$\mathbf{u}^o(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t), \mathbf{K}(t) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t). \quad (3.12)$$

A (3.11) egyenlet nemlineáris, elsőrendű mátrix differenciál-egyenlet, amit időben inverz módon oldunk meg, amikor is feltételezzük, hogy $T \rightarrow \infty$. Könnyen belátható, hogy a végidejű feladat esetén, nagy értékű időkre, a \mathbf{P} mátrix lassan változónak, vagy jó közelítéssel állandónak is tekinthető. Ekkor a (3.11) Ricatti-egyenlet megoldása aszimptotikusan stabilis zárt szabályozási rendszert eredményez, más szóval, a (3.11) egyenlet a következő alakban is felírható:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{Q} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} = 0, \quad (3.13)$$

és az optimális vezérlési törvény az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$\mathbf{u}^o(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}. \quad (3.14)$$

Matematikában, és modern szabályozástechnikában a (3.13) egyenletet szokás *elfajult Ricatti-féle algebrai egyenletnek* is nevezni. A (3.13)–(3.14) egyenlettel megadott feltételek teljesülése az optimális vezérlési törvény létezésének szükséges és elégséges feltétele.

A szabályozótervezés két lépésben történik:

1. A (3.13) egyenletet megoldva meghatározzuk a \mathbf{P} költségmátrixot;
2. A \mathbf{P} költségmátrixot behelyettesítjük a (3.14) vezérlési törvénybe. A vezérlési törvény optimális a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} súlyozó mátrix-párra.

IV. UAV REPÜLÉSI MAGASSÁG STABILIZÁLÓ RENDSZER ELŐZETES, SZÁMÍTÓGÉPES TERVEZÉSE.

Vizsgáljuk egy hipotetikus UAV repülési magasságstabilizáló rendszer hatásvázlatát, ami a 4.1. ábrán látható.

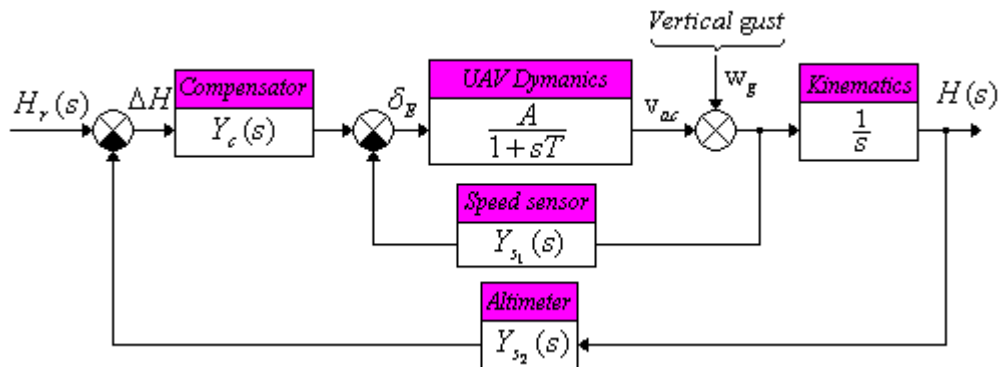


Figure 4.1. UAV magasságstabilizáló rendszer hatásvázlata.

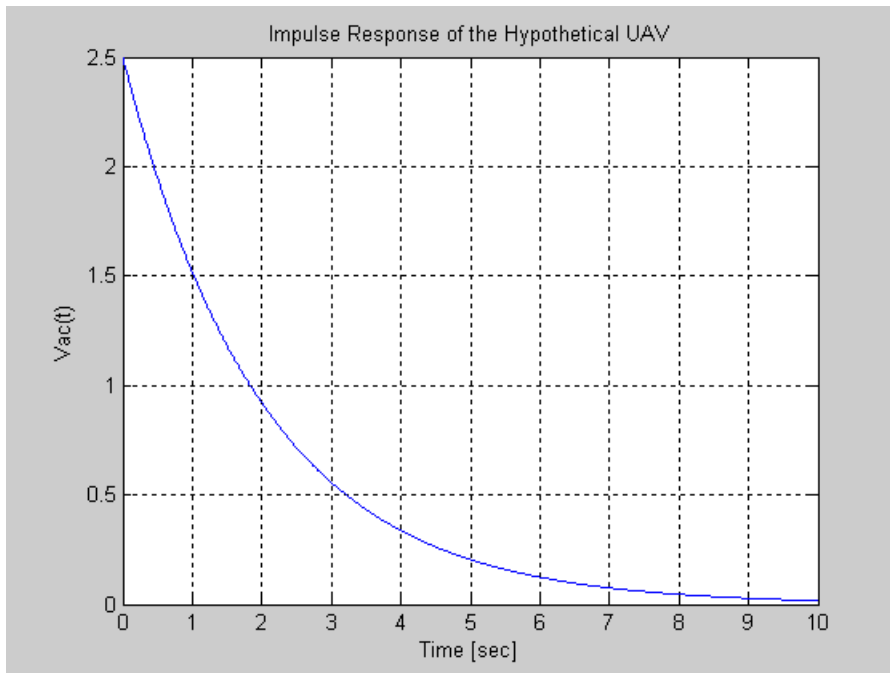
A 4.1. ábrán látható repülésszabályozó rendszer teljes állapot-visszacsatolású, és a függőleges irányítási csatornát külső sztochasztikus zaj gerjeszti. Az UAV dinamikát a következő átviteli függvény adja meg:

$$Y(s) = \frac{v_{ac}(s)}{\delta_E(s)} = \frac{A}{1+sT} = \frac{5}{1+2s}, \quad (4.1)$$

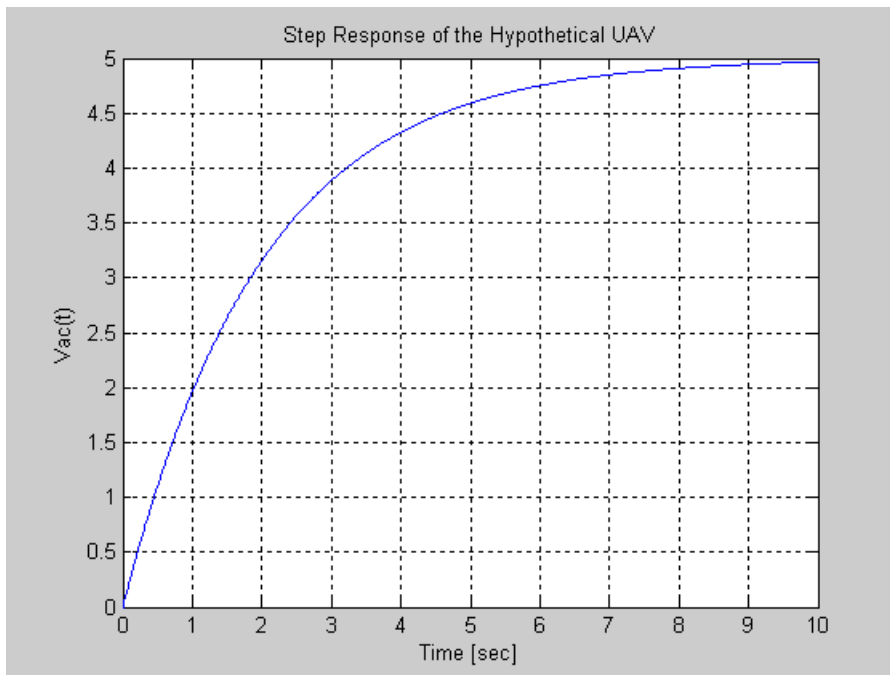
ahol $v_{ac}(s)$ függőleges repülési sebesség; δ_E a magassági kormány szögkitérése; $H_r(s)$ a repülési magasság referencia értéke; $H(s)$ a pillanatnyi repülési magasság; $\Delta H(s)$ a hibajel. A (4.1) átviteli függvény paramétereinek megválasztása heurisztikusan történt, a legegyszerűbb arányos-tárolós dinamika mellett. A repülési sebesség érzékelőjének átviteli függvénye $Y_{s1}(s)$, és az egyik megválasztandó (tervezendő) paramétert szimbolizálja. A barometrikus magasságmérő átviteli függvénye $Y_{s2}(s)$, és egységnyi erősítésű tagként vesszük figyelembe. A soros szabályozó átviteli függvénye $Y_c(s)$, és ez a tag képviseli a második megválasztandó paramétert.

4.1. A nemirányított UAV vizsgálata

Az UAV felnyitott szabályozási rendszert úgy idő-, mint frekvenciatartományban is vizsgáljuk. A számítógépes analízis eredménye a 4.2. ábrán látható.



4.2-1. ábra.



4.2-2. ábra.

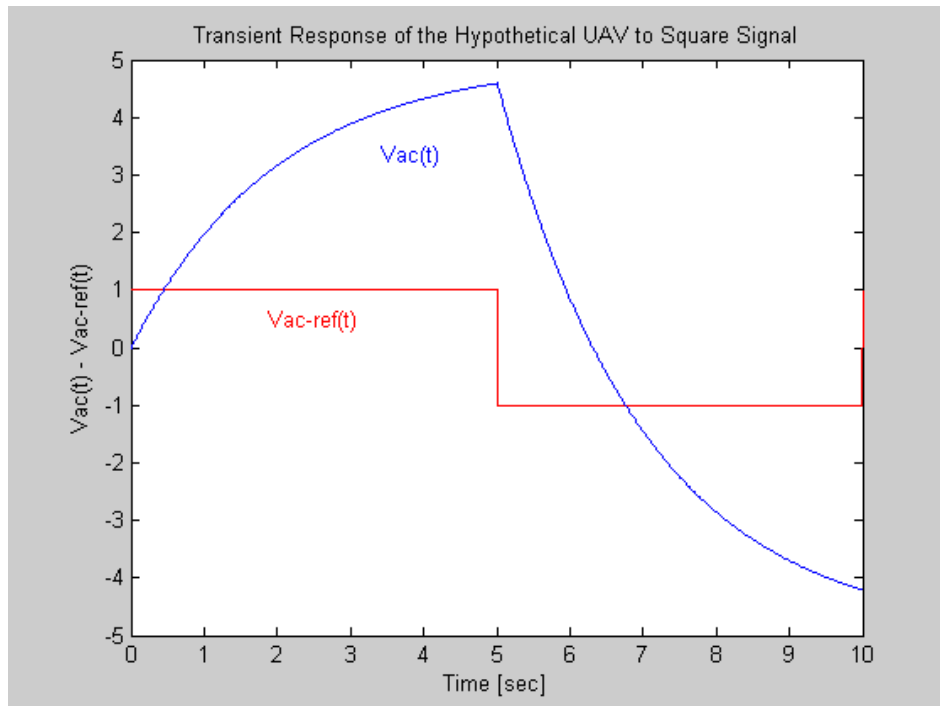


MAGYARORSZÁG MEGÚJUL

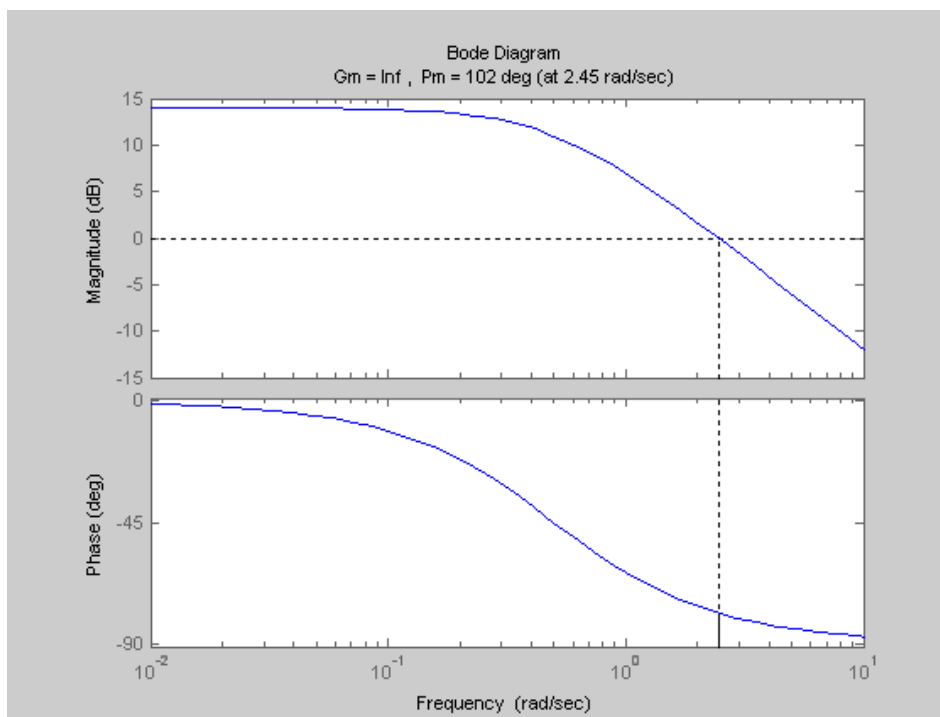


A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)



4.2-3. ábra.



4.2-4. ábra.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A 4.2-1. ábrán a súlyfüggvény, míg a 4.2-2. ábrán az átmeneti függvény látható. A tranziens analízis eredményeként könnyű belátni, hogy a nemirányított UAV valóban exponenciális jelleggel viselkedik.

Mindazonáltal megemlíteni szükséges, hogy az UAV nagyon lassan reagál a bemeneti jelekre, és azok nem esnek a minőségi jellemzők megadott tartományába [8, 9, 14, 19]. A 4.2-3. ábra az UAV $T = 10$ sec periódusidejű négyszögjelre, mint bemenet jelre adott válasza látható. A lassú viselkedés előre vetíti, hogy az előírt minőségi jellemzők teljesítéséhez automatikus repülésszabályozó rendszer szükséges az átmeneti idő csökkentése érdekében.

A 4.2-4. ábrán az UAV Bode diagramja látható. Az UAV frekvenciatartománybeli minőségi jellemzői megfelelnek az előírásoknak, az erősítési tartalék értéke $Gm = \infty$, míg a fázistartalék értéke $Pm = 102^\circ$.

Az idő-, és a frekvenciatartománybeli viselkedés jellege alapján megállapítható, hogy az elvárt minőségi jellemzők egyidejű teljesítéséhez automatikus repülésszabályozó rendszert szükséges alkalmazni, melynek tervezésére számos klasszikus-, és modern eljárás áll rendelkezésre. E fejezetben az optimális LQ-alapú tervezéssel foglalkozunk.

4.2. Súlyozó mátrixok megválasztása az LQR módszer alkalmazásához

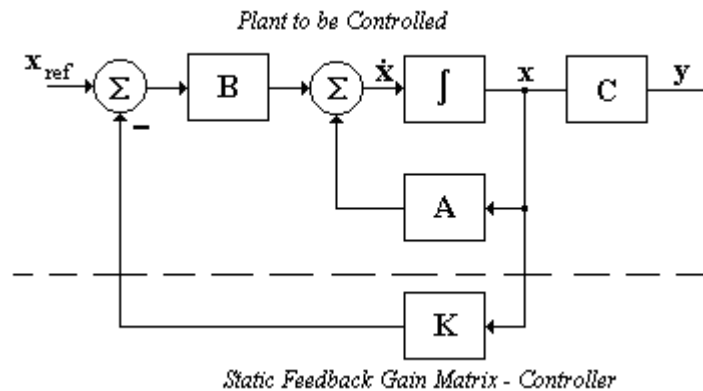
Mielőtt elkezdenénk a 4.1. ábrán látható zárt szabályozási rendszer paramétereit tervezni, először adjuk meg a zárt automatikus repülésszabályozó rendszer elvárt minőségi jellemzőit. E minőségi jellemzőket az 1. Táblázat foglalja össze.

A zárt repülésszabályozó rendszer minőségi jellemzői

1. Táblázat

Időtartománybeli minőségi követelmények	Frekvenciatartománybeli minőségi követelmények
Tranziens idő: $t_{ss} \leq 2$ sec	Erősítési tartalék: $Gm \geq 10$ dB
Csillapítási tényező: $0,7 \leq \xi \leq 0,8$	Fázistartalék: $Pm \geq 45^\circ$.

Tekintettel arra, hogy az LQR szabályozótervezési eljárás lineáris, többváltozós, determinisztikus szabályozási rendszerre dolgozták ki, ezért a 4.1. ábrán látható szabályozási rendszer állapotter reprezentációs alakja elengedhetetlen a feladat megoldásához. Térjünk át az állapotterre. A szükséges inverz Laplace-transzformációk végrehajtása után kapjuk a többváltozós automatikus repülésszabályozó rendszer állapotter reprezentációs alakját, ami a 4.3. ábrán látható.



4.3. ábra. Az automatikus repülésszabályozó rendszer állapotteres alakja.

Az inverz Laplace-transzformáció segítségével, a 4.3 ábrán megadott rendszer hatásvázlatát konvertáljuk az állapotteres dinamikus modellre. Az alábbi állapot-, és kimeneti egyenletet kapjuk:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ac} \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A \\ T \end{bmatrix} \delta_E = \begin{bmatrix} -0,5 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ac} \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2,5 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_E \quad (4.2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ac} \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_E$$

A teljes állapot-visszacsatolási métrix most a következő lesz:

$$\mathbf{K} = [\mathbf{Y}_{s_1} \quad \mathbf{Y}_c]. \quad (4.3)$$

A 4.3. ábrán látható zárt szabályozási rendszer tervezésekor első lépésben meg kell adni a (3.2) kritérium súlyozó mátrixait. Alkalmazzuk első lépésben az azonos súlyozás elvét, vagyis legyenek a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} súlyozó mátrixok az alábbiak:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_1 = r_1 = 1. \quad (4.4)$$

A (4.4) súlyozó mátrixokra elvégeztük a tervezést, és kaptuk, hogy [10, 11, 12, 17, 18]:

$$\mathbf{K}_1 = [1, 1565 \quad 1]; \mathbf{Y}_{s_1} = 1,1565; \mathbf{Y}_c = 1. \quad (4.5)$$

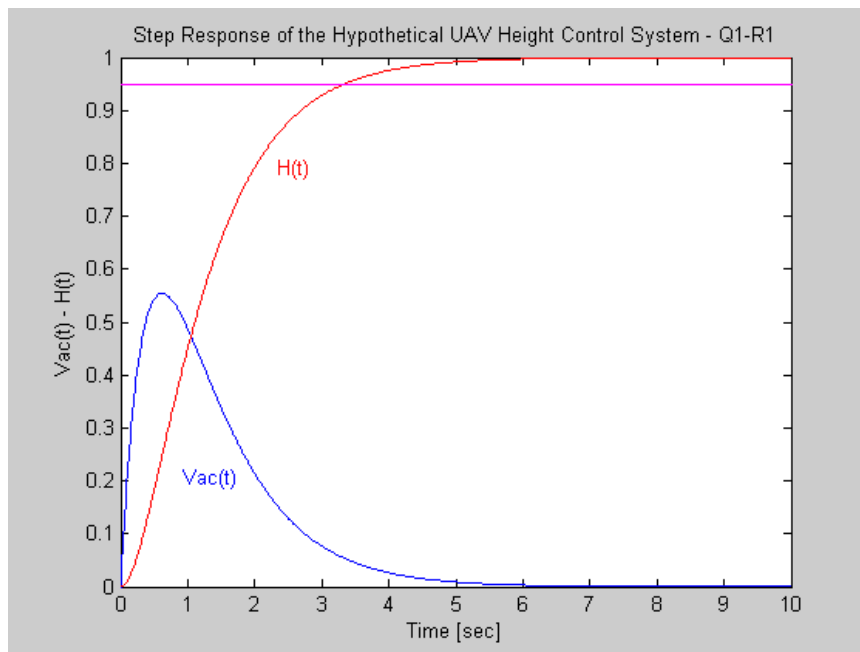
A zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőit a 2. Táblázat foglalja össze.

A zárt szabályozás minőségi jellemzői

2. Táblázat

Sajátértékek	Csillapítási tényező, ξ	Körfrekvencia, [rad/s]
-1,08	1	1,08
-2,31	1	2,31

A zárt repülésszabályozó rendszer átmeneti függvénye a 4.4. ábrán látható. A tranziens idő – $\Delta = \pm 5\%$ dinamikus pontosság esetén $t_{ss} \cong 3,3 \text{ sec}$, míg a csillapítási tényező egységnyi értékű. A dinamikus rendszer exponenciális jelleggel viselkedik.



4.4. ábra. Az UAV magasságstabilizáló rendszer átmeneti függvénye.

A (4.4) súlyozó mátrixokat hangoljuk heurisztikusan úgy, hogy közben teljesüljön az alábbi tervezési kritérium: $t_{ss} \leq 2 \text{ sec}$. Alkalmazuk az alábbi súlyozó mátrixokat:

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_2 = r_2 = 15. \quad (4.6)$$

A (4.6) mátrixokat felhasználva, a optimális, teljes állapot-visszacsatolási mátrix a következő lesz [17, 18]:

$$\mathbf{K}_2 = [0,7201 \quad 1]; Y_{s1} = 0,7201; Y_c = 1. \quad (4.7)$$

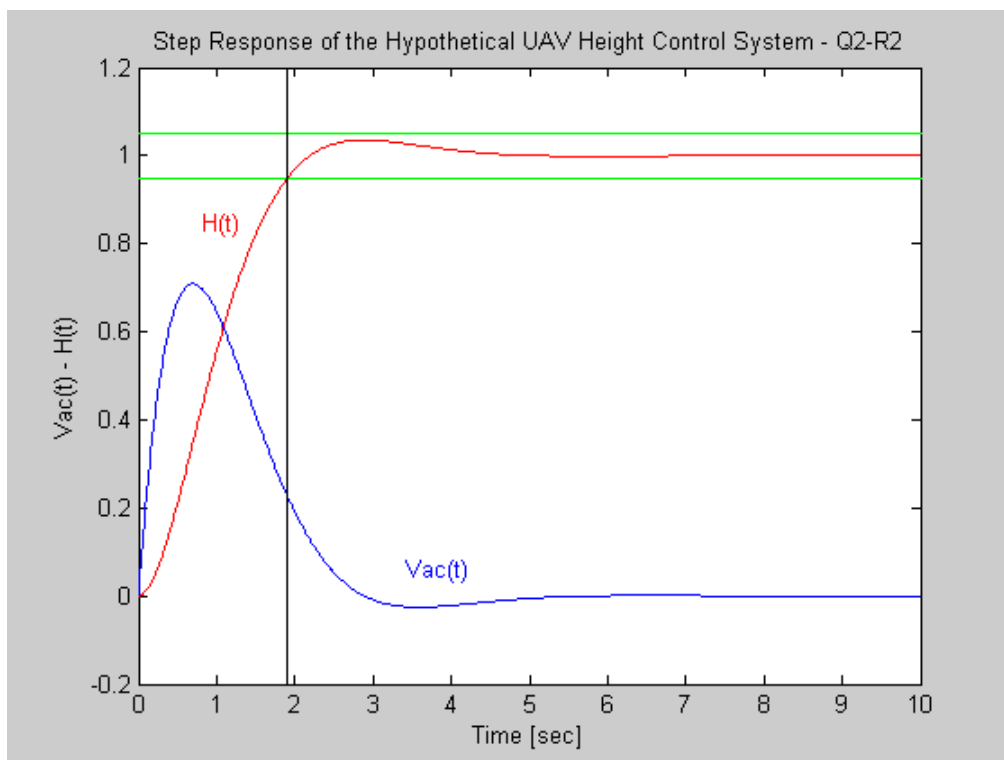
A (4.7) mátrix segítségével zárjuk a szabályozást, és meghatároztuk meg a minőségi jellemzőket, amelyek a 3. Táblázatban láthatóak.

A zárt szabályozás minőségi jellemzői

3. Táblázat

Sajátértékek	Csillapítási tényező, ξ	Körfrekvencia, [rad/s]
$-1,15+1.08i$	0,727	1,58
$-1,15-1.08i$	0,727	1,58

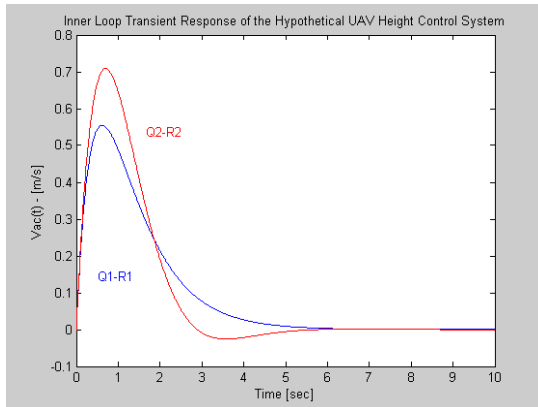
A zárt magasságstabilizáló rendszer átmeneti függvénye a 4.5. ábrán látható.



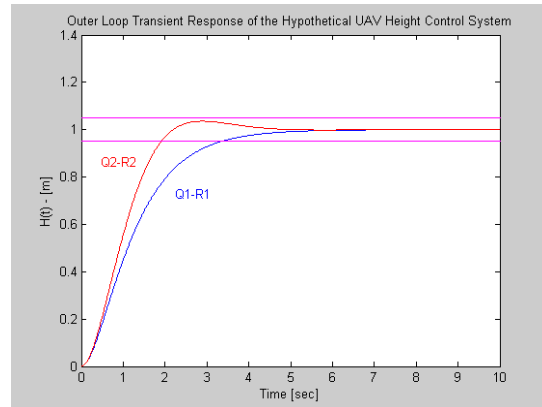
4.5. ábra. Az UAV magasságstabilizáló rendszer átmeneti függvénye.

A 4.5. ábrán jól látható, hogy a tranziens idő $t_{ss} \cong 1,8\text{sec}$, míg a csillapítási tényező $\xi = 0,727$, vagyis sikerült teljesíteni az előírt minőségi követelményt, vagyis, a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői megfelelnek az 1. Táblázatban megadott értékeknek.

A két súlyozással tervezett rendszert összehasonlítottuk, a számítógépes szimuláció eredményei a 4.6. ábrán láthatóak. Az ábra bal oldalán a belső hurok (függőleges ebesség), míg a jobb oldalon a repülési magasság-változás időfüggvényei láthatóak. A 4.6. ábra alapján megállapítható, hogy a (4.6) egyenlettel megadott súlyok esetén a belső hurok lengési hajlama nő, viszont a külső hurok transziens viselkedése gyorsul.

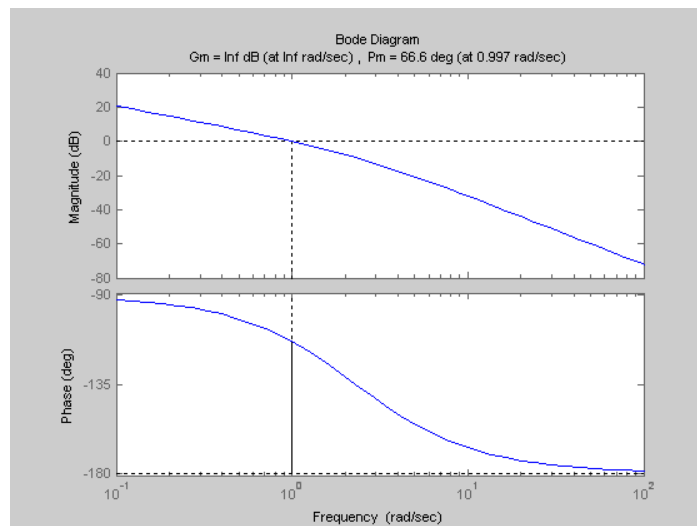


4.6-1. ábra. Belső hurok viselkedése.



4.6-2. ábra. Külső hurok viselkedése.

Vizsgáljuk meg a felnyitott szabályozási rendszer frekvenciafüggvényét! A Bode-diagram a 4.7. ábrán látható.



4.7. Ábra. A magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja.

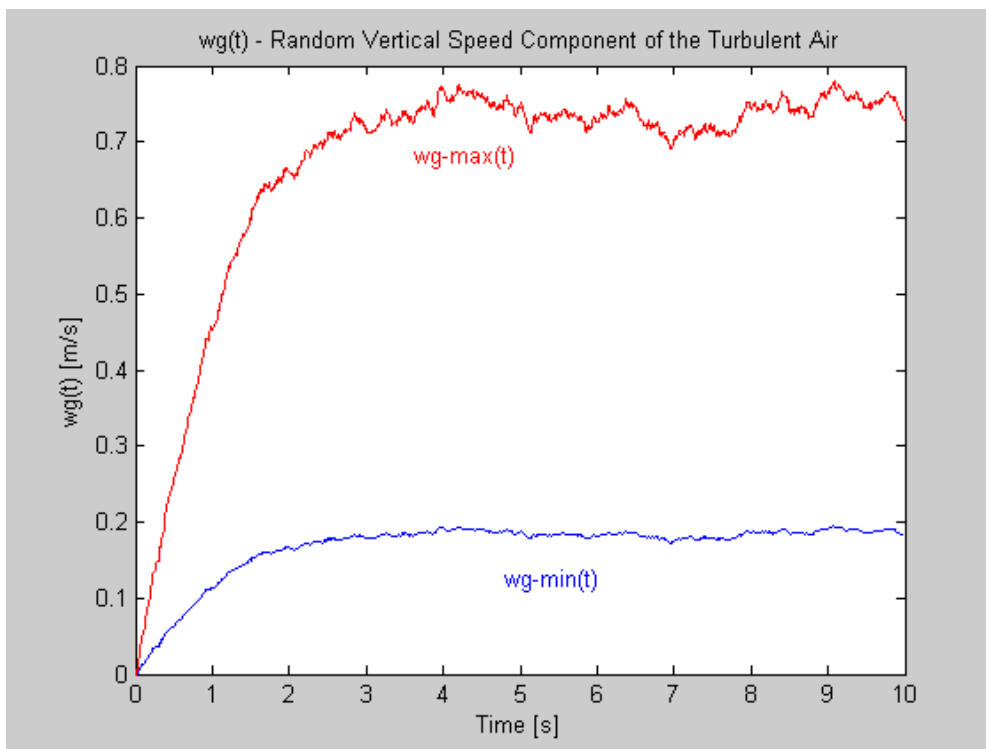
A 4.7. ábrán jól látható, hogy a frekvenciatartománybeli minőségi jellemzők az alábbiak:

$$G_m = \infty, P_m = 66,6^0. \quad (4.8)$$

Mivel a (4.8) minőségi jellemzők megfelelnek az 1. Táblázatban foglalt tervezési követelményeknek, ezért a tervezési feladatot sikeresen befejezettek tekintjük.

4.3. A zavarelhárítás vizsgálata

A szabályozó megtervezése után, az alapjel követési képesség vizsgálata mellett fontos a zárt szabályozási zavarvédetségének az ismerete is. A 4.8. ábrán a $w_g(t)$ függőleges szél egy-egy időszora látható.



4.8. ábra. A légköri turbulencia függőleges sebességi időszora.

Ismeretes, hogy a $w_g(t)$ szélességi komponens számos körülménytől függ. Legyenek a kezdeti feltételek az alábbiak [20]:

$$H = 100 \text{ m} \cong 328,084 \text{ feet}; U_0 = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}, \quad (4.9)$$

$$0,45 \text{ m/s} \leq \sigma_w \leq 1,8 \text{ m/s}, L_w = 580 \text{ m}, \quad (4.10)$$

ahol: H a repülési magasság [m]; U_0 az UAV sebessége [m/s], σ_w a szórás [m/s], és L_w a léptéktényező [m]. A σ_w minimális értéke a NASA-szabványosk szerint a függőleges könnyű szélnek, míg a szórás maximális értéke a közepes szelet jelenti [20]. A vizsgálatok során használt függőleges szél idősorokat a 4.8. ábrán láthatjuk.

A 4.2. fejezetben bemutatott tervezés során kapott eredményeket felhasználva kapjuk, hogy

$$\mathbf{K}_2 = [0,7201 \quad 1]; Y_{s_1} = 0,7201; Y_c = 1. \quad (4.11)$$

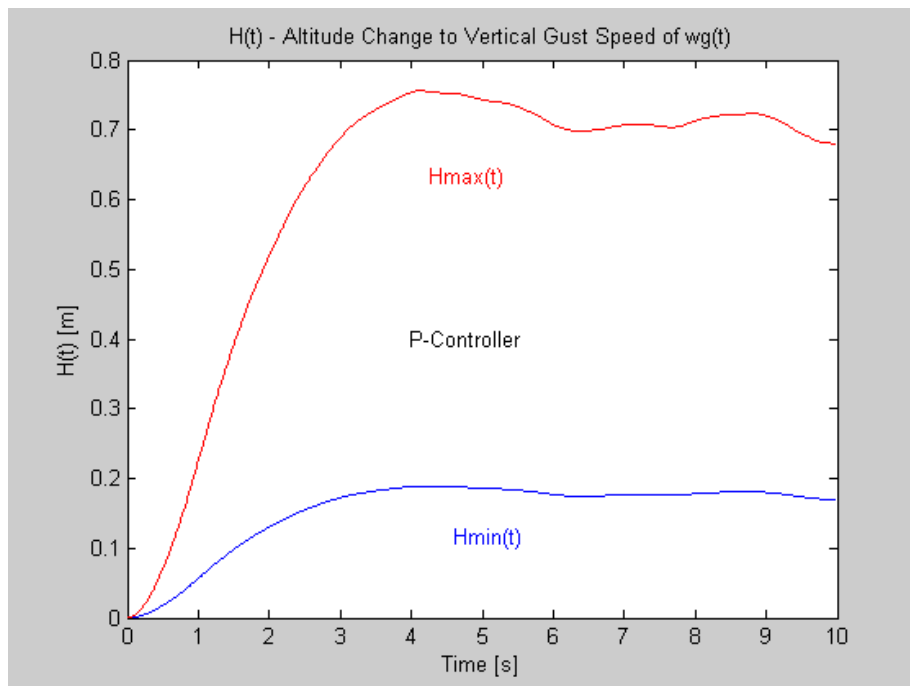
A zavarelhárítási képességet vizsgáljuk a 4.1. ábra segítségével. A feladat során, változatlan alapjel mellett, vagyis $H_r(t) = 0$, feltételezzük, hogy a légköri turbulencia függőleges összetevője hat az UAV-ra. A zavaró jellemzőr evonatkoztatptt eredő átviuteli függvény a következő egyenlettel adható meg:

$$W_d(s) = \frac{H(s)}{w_g(s)} \Big|_{H_r(s)=0} = \frac{2s + 4,6005}{2s^2 + 4,6005s + 5}. \quad (4.12)$$

A (4.12) egyenletből kapjuk, hogy

$$H(s) = W_d(s)w_g(s). \quad (4.13)$$

A (4.13) rendszer bemenetére kapcsolva a (4.8) ábrán látható idősorokat, kapjuk a 4.9. ábrán látható válaszfüggvényeket.



4.9. ábra. Repülési magasság viselkedése turbulenciában.

A 4.9. ábra alapján egállapítható, hogy az automatikus repülésszabályozó rendszer az alkalmazott P-szabályozó mellett, nem képes kompenzálni a függőleges szelet: statikus hiba marad a rendszer kimenetén. A hibajel időfüggvénye:

$$\Delta H(t) = H_r(t) - H(t) = -H(t). \quad (4.14)$$

$$|\Delta H(t)| \cong 0,7 \text{ m}, \quad (4.15)$$

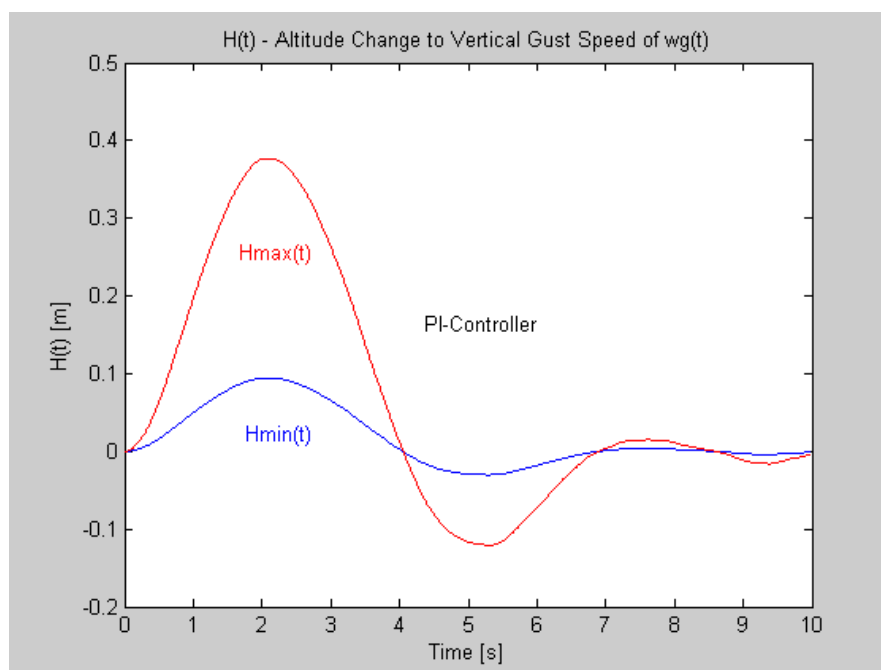
amely 0,7 %-a a $H_0 = 100 \text{ m}$ egyensúlyi repülési magasság értékének. E hibajel arról tanúskodik, hogy a repülésszabályozó rendszer még a legegyszerűbb, P-szabályozó mellett is jól tartja az alapjelet. Ismeretes, hogy a szabályozástechnikából ismert PI-szabályozó javítja a zárt szabályozási rendszerek zavarvédetségét. Alkalmazzuk a következő átviteli függvényt:

$$Y_c = 1 + \frac{1}{s}. \quad (4.16)$$

A (4.16) szabályozó alkalmazása esetén a zavaró jellemzőre vonatkozó átviteli függvény a következő lesz:

$$W_d(s) = \frac{H(s)}{w_g(s)} \Big|_{H_r(s)=0} = \frac{2s^2 + 4,6005s}{2s^3 + 4,6005s^2 + 5s + 5}. \quad (4.17)$$

Vizsgáljuk meg a 4.1. ábrán látható zárt UAV repülésszabályozó rendszert, amely a (4.16) szabályozóval működik. A számítógépes analízis eredménye a 4.10. ábrán látható.



4.10. ábra. UAV repülési magasság viselkedése turbulenciában.

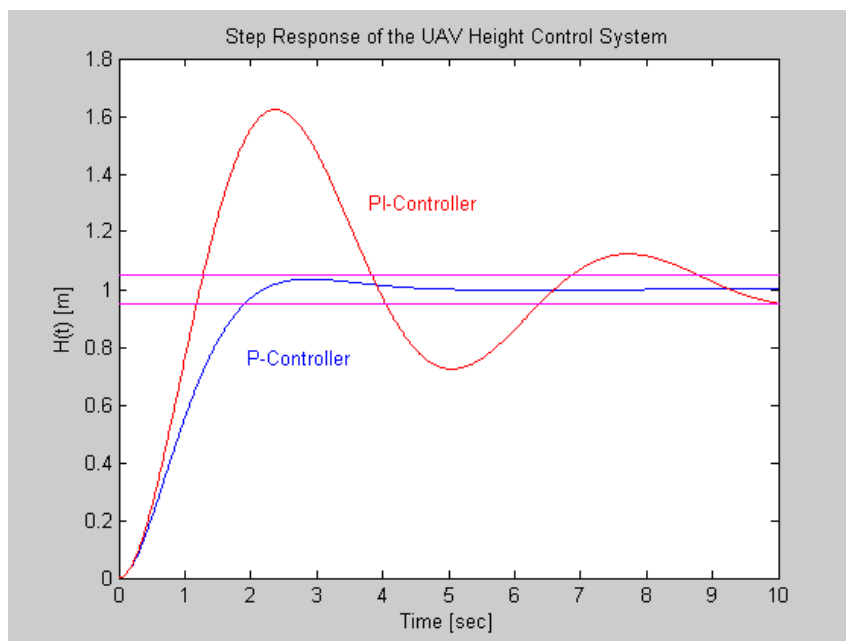
A zárt szabályozási rendszer válasza a bemeneti jelre, a Laplace-ttranszformáció végérték-tétele szerint, a következő módon határozható meg:

$$H(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} sH(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sW_d(s)w_g(s) = \frac{2s^2 + 4,6005s}{2s^3 + 4,6005s^2 + 5s + 5} = 0. \quad (4.18)$$

A 4.9. ábrán is jól látható, hogy a zárt szabályozási rendszer kimenet jele zérushoz tart, kellően nagyértékű idő eltelte után.

4.4. Transient Response Analysis of the Height Control System

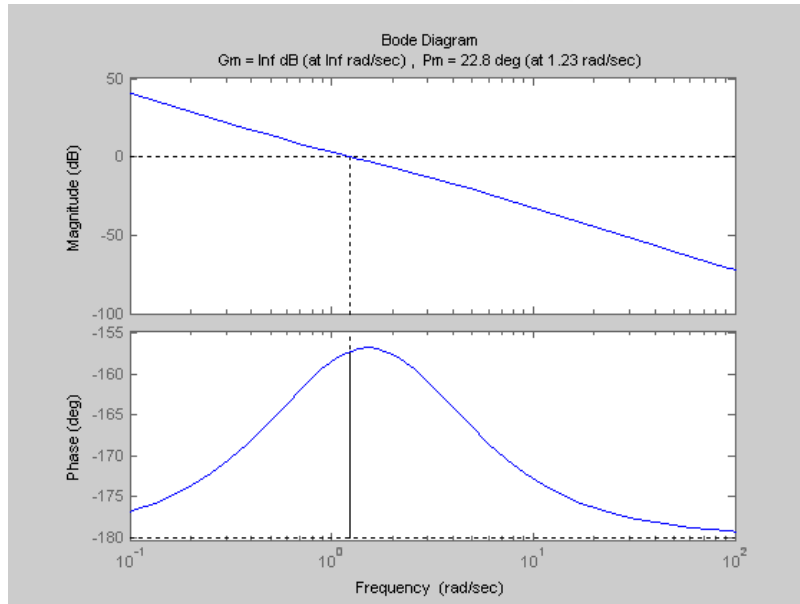
A P-, és a PI-szabályozóval működő zárt szabályozási rendszer tranziens viselkedése a 4.11. ábrán látható.



4.11. ábra. UAV repülési magasság tranziens viselkedése.

A 4.11. ábra alapján könnyű belátni, hogy a PI-szabályozó alapjel követés során növeli a lengési hajlamot, nő a túllövés, és nő a tranziens idő is: az átmeneti idő $t_{ss} \cong 8,7 \text{ sec}$. A rendszer gyorsítható, ha PID-szabályozót használunk.

Az UAV automatikus repülésszabályozó rendszer 4.1. ábrán látható szabályozási rendszer felnyitott körének Bode-diagramja a 4.12. ábrán látható. Az erősítési tartalék tart a végtrelenhez, míg a fázistartalék értéke $P_m \cong 22,8^0$. A szabályozási rendszer a kisfrekvenciás jeleket (az alapjel általában ebben a tartományban hat) nagy erősítéssel viszi át, míg nagyfrekvenciás tartományban (a szenzor zajok általában ebben a tartományban helyezkednek el) a körerősítés nagyon kicsi értékű, tehát a zavarjeleket jól szűri a rendszer. Azt is mondhatjuk, hogy az UAV automatikus repülésszabályozó rendszere kellően robusztus a zavarásokkal szemben.

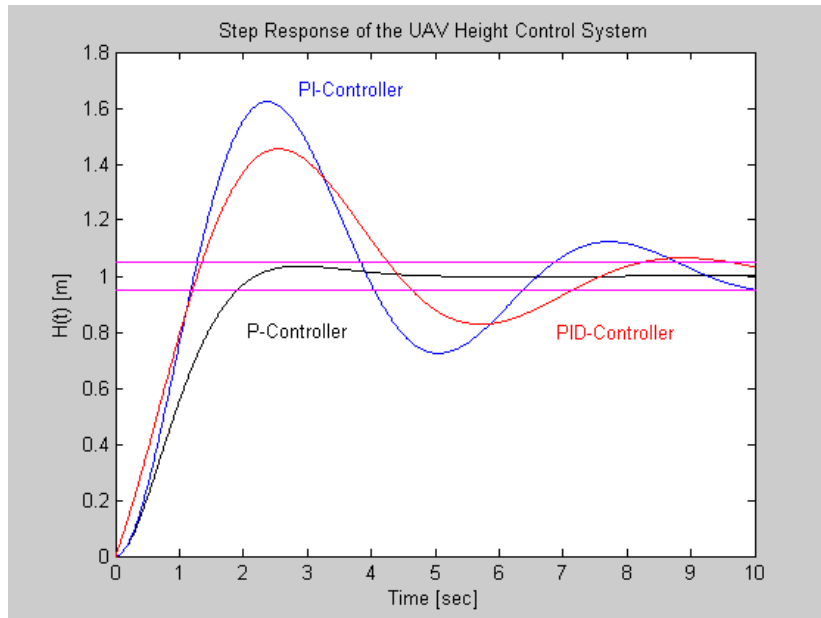


4.12. ábra. UAV felnyitott magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja.

Korábban említettük, hogy a PID-szabályozó, legalább részben képes kompenzálni a PI-szabályozó hátrányait. Alkalmazzuk az alábbi PID-szabályozót:

$$Y_c = 1 + \frac{1}{s} + 0,25s . \quad (4.19)$$

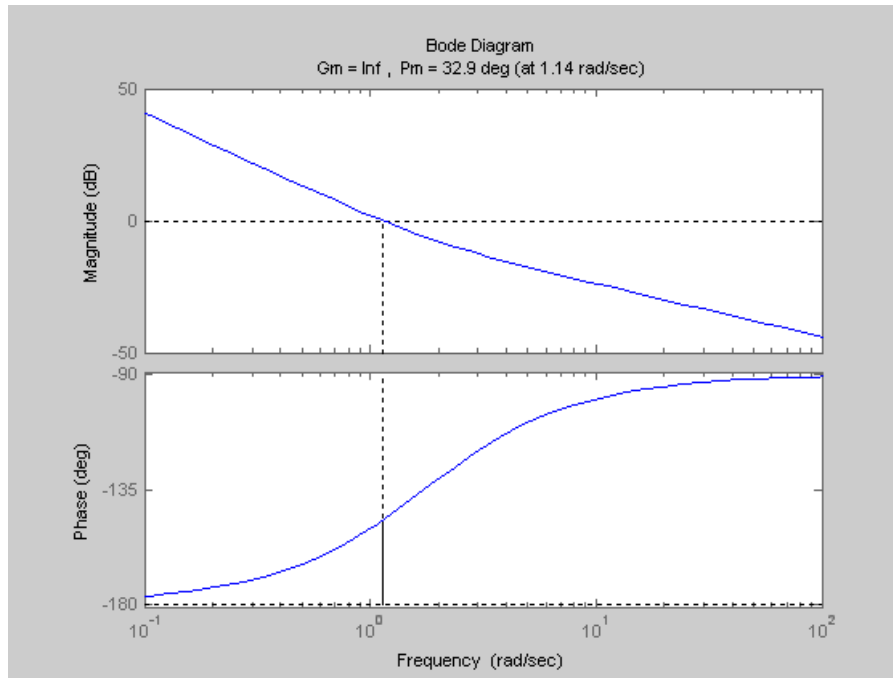
A (4.19) szabályozóval működő UAV repülésszabályozó rendszer tranziens viselkedése a 4.13. ábrán látható.



4.13. ábra. UAV repülési magasság tranziens viselkedése.

A 4.13. ábrán jól látható, hogy a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői lényeges mértékben javulnak: csökken a túllövés, és csökken a tranziens idő is, ha PID-szabályozót alkalmazunk. Nyilvánvaló, hogy a PID-szabályozó további hangolásával az UAV zárt repülésszabályozó rendszer minőségi jellemzői tovább javíthatóak.

A PID-szabályozóval működő felnyitott UAV magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja a 4.14. ábrán látható.



4.14. ábra. UAV felnyitott magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja.

A 4.14. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a fázistartalék javul, a PID-szabályozó alkalmazásával az új értéke $P_m \cong 32,9^0$.

V. KÖVETKEZTETÉSEK

Az LQR optimális szabályozótervezés alkalmas módszer a teljes állapot-visszacsatolású UAV automatikus repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak előzetes tervezésére. A megtervezett rendszer szabályozója statikus P-típusú, amit sokszor tovább kell fejleszteni, és helyette PI-, vagy PID-szabályozót használunk. A gyakorlatban a PID-szabályozók, mint fedélzeti robotpilóták széles körben használtak. Alkalmazzák például az MP2000, vagy az MP2028 robotpilótákban is. A fejezetben bemutatott tervezés módszerek nagyban segíthetik a robotpilóták hangolásának folyamatát.

VI. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Csáki, F. *Korszerű szabályozásméletek*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- [2] Csáki, F. *Fejezetek a szabályozástechnikából — Állapot-egyenletek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [3] Csáki, F. (szerk.) *Irányítástechnikai kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [4] Kuo, B. C. *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- [5] Ogata, K. *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- [6] McLean, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall, International (UK) Ltd., New York, London, Toronto, 1990.
- [7] Brogan, W. L. *Modern Control Theory*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [8] MIL-F-9490D, Notice 1, Flight Control Systems – Design, Installation, and Test of Piloted Aircraft, General Specification, 1992.
- [9] MIL-C-18244A, Amendment 1, Control and Stabilization System: Automatic, Piloted Aircraft, General Specification, 1993.
- [10] Shahian, B. – Hassul, M. *Control System Design using MATLAB®*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [11] Ogata, K. *Designing Linear Control Systems with MATLAB®*, Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [12] Ogata, K. *Solving Control Engineering Problems with MATLAB®*, Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [13] Dorf, R. C. – Bishop, R. H. *Modern Control Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
- [14] MIL-F-8785C, Notice 2, Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [15] Nelson, R. C. *Flight Stability and Control*, McGraw-Hill Companies, Inc., Boston, Massachusetts, Burr Ridge, 1998.
- [16] Dorf, R. C. – Bishop, R. H. *Modern Control Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2001.
- [17] *Control System Toolbox 5.1 for Use with MATLAB®* (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [18] *MATLAB® 6.5 – The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2002.
- [19] MIL-STD-1797A, Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft, Department of Defense, Interface Standard, 2004.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

- [20] SZABOLCSI, Róbert – MÉSZÁROS, György: *Computer Aided Simulation of the Random Atmospheric Turbulences*, CD-ROM Proceedings of the 6th International Conference on Crisis Management, ISBN 978-80-7231-510-9, pp(366-379), 14-15 May, 2008, Brno, Czech Republic.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

III. FEJEZET

KÜLSŐ KÖRNYEZET MATEMATIKAI MODELLEZÉSE, FEDÉLZETI SZENZORZAJOK MODELLEZÉSE

REZÜMÉ

E fejezet a légköri turbulencia matematikai modellezésével, valamint e matematikai modellek gyakorlati alkalmazásával foglalkozik. A szerző célja bemutatni a légköri turbulencia sztochasztikus matematikai modelljeit, valamint extrém légköri jelenségekre megadni a légköri turbulencia sebességvektora összetevőinek idősorait. A másik fontos, megoldásra kitűzött feladat: megvizsgálni, hogy a repülőgépek stabilitásjavító rendszerei, a csillapító automaták hogyan képesek szűrni a légköri turbulencia repülési paraméterekre gyakorolt hatását.

I. BEVEZETÉS

A repülés egyik fontos sajátossága, hogy a levegő, ahol a repülés lezajlik, szinte sohasem nyugodt. A 2007. év nyara, és az azt követő időszak azt igazolta, és bizonyította, hogy a klímaváltozás egyik fontos „velejárója” az extrém felmelegedés, az erdőtüzek, a bozóttüzek, láptüzek, és más természeti értékek pusztulása. A nappali felmelegedéseket sokszor hatalmas, a szárazföldi éghajlati övben már trópusinak mondható orkán erejű szelek, szélviharok, és esők követhetik.

Tekintettel eme sajátos változásokra, számos ország széleskörű légi előrejelző-, figyelő-, mérő-, illetve mentő-kapacitást épít ki. A fent említett feladatok megoldása során a repülés már nemhagyományosnak számít: sokszor előre nem prognosztizálható, nem látható, és nem detektálható jelenségekkel kell megküzdeni a hajózó személyzetnek. Sajnos, ez néha katasztrófához is vezet.

Sok repülőgép, már a kis-, és közepes kategóriájú repülőgépek is, rendelkezik automatikus repülésszabályozó rendszerrel, ami nagyban segíti a repülőgép-vezető tevékenységét. E rendszerek alapvetően a légi jármű térbeli helyzetének stabilizálására, vagy adott algoritmus szerinti megváltoztatására hivatottak.

A légkör, amelyben a légi jármű repül, soha nincs teljes nyugalomban. Ebből következik, hogy a valós környezetben történő repülő légi jármű mozgása kiszámíthatatlan. A repülőgépre ható atmoszférikus zavarások két osztálya ismeretes:

- 1) *konvektív turbulencia*, amely felhőben, és azok környékén alakul ki;
- 2) *tiszta légköri turbulencia*.

A felhőalap alatt a konvekció felmelegíti a levegőt. Eme levegőáramlás kiegészülhet a meleg földfelszínről felemelkedő nagyszámú, kis intenzitású légörvénnyel. Ezt a

levegőáramlást enyhe turbulenciának is szokás nevezni. Intenzívebb turbulens áramlások alakulhatnak ki hegyek közelében is.

Bizonyos meteorológiai körülmények között a tropopauzában végrehajtott repülések turbulens zónákon vezethetnek át.

Szélsőséges légköri turbulenciának nevezhetjük a szélnyírásokat és a *microburst*-öket. Szélnyírásnak nevezik a szélesebbé bármely irányban megfigyelt változását. Szélnyírás alakul ki a földfelszín közelében is, amikor a szélesebbé a függőleges irányban változik, a földhöz közeledve (többnyire) egyre csökken. Az ilyen szélnyírás különösen a leszálló repülőgépekre veszélyes. A repülőgép ugyanis a biztonság kedvéért a széllal szemben mozog. A gépre ható megfúvási sebesség a gép mozgási sebesség és a szélesebbé összegeként számítható. A magasság csökkenésével azonban csökken a gépre ható valóságos megfúvási sebesség, csökken a felhajtóerő, és a gép megsüllyed, azaz a szükséges repülési pályát nem tudja tartani. Mivel a változás lassú, a repülőgép-vezetők általában későn érzékelik a gép kelleténél gyorsabb süllyedését. További gyakori hiba, hogy a repülőgép-vezetők nem ismerik fel a szélnyírás jelenségét és csak az aerodinamikai kormánysszerveket, azaz a magassági kormányt alkalmazzák. Mire észlelik, hogy ez kevés, már előfordulhat, nincs elég idejük a módosításra, mielőtt a gázkar átállítása után a hajtóművek felgyorsulnának a repülőgép a leszállópálya előtt a földnek is ütközhet.

A *microburst* egy összetettebb jelenség, amely általában zivatarfelhőkben alakul ki, csak néhány km-es körzetre terjed ki és jellemzője, hogy a középső részén nagysebességgel hideg levegő süllyed (áramlik lefelé). A *microburst*-öket gyakran szintén szélnyírásnak nevezik.

A szélnyírások meglehetősen rövid ideig hatnak. Ha a szélnyírás repülőtereken alakul ki – a tárgyalta szerint - alapvetően befolyásolja a repülést, veszélyezteti a fel- és a leszálló repülőgépek biztonságát. Modern rádiótechnikai eszközökkel a szélnyírás detektálható, és a szükséges intézkedések meghozatalával a repülések megfelelő szintű biztonsága garantálható. A továbbiakban tekintsük át a légköri turbulencia rendelkezésre álló matematikai modelljeit.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A légköri turbulencia matematikai modellezése, és a turbulencia repülésre gyakorolt hatása már rég foglalkoztatja a kutatókat. A sztochasztikus jelek és sztochasztikus dinamikus rendszerek matematikai leírásával az [1, 2] irodalmak foglalkoznak.

A légköri turbulencia repülésdinamikai modellekre gyakorolt hatását a [3, 4] irodalmak taglalják részletesen. E könyvek szerzői a dinamikus automatikus repülésszabályozó rendszerek működését a klasszikus tárgyalási módszerek (pl. Bode-módszer, Nyquist-módszer) segítségével vizsgálják. Más szóval, az automatikus repülésszabályozó rendszert egyváltozósnak tekintik, vagyis a klasszikus tárgyalási módszer elvi alapjaiból kiindulva egy bemenetű, és egy kimenetűnek tekintik a repülésszabályozó

rendszer. Könnyen belátható, hogy a dinamikus rendszerek eme approximációja ma már szükségtelen, hiszen a korszerű számítógépes programok képesek a több bemenetű, és több kimenetű (többváltozós) szabályozási rendszerek szintézisére, és analízisére is.

Az [5] irodalom összefoglalja a széllekek, és a légköri turbulencia modelleket, valamint számos hatóság és kutatóintézet által identifikált és publikált turbulencia-modell paramétereit adja meg. A fejezet elkészítése során e paraméterek alapvető fontosságúak.

McLean, D. könyvében – alapvetően katonai szabványokra támaszkodva – szintén számos turbulencia modellt ad meg, és közli a sztochasztikus modellek statisztikai paramétereit is [6]. McLean, D. számos repülésdinamikai sztochasztikus modellt ad meg, valamint bemutatja a többváltozós automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezését, valamint azok vizsgálatát is: részletesen taglalja a fent említett többváltozós repülésszabályozó rendszerek vizsgálatát is.

A sztochasztikus jelek és rendszerek számítógépes szimulációjával, valamint a dinamikus rendszerek statisztikus vizsgálatával a [7] foglalkozik, és a MATLAB® 4.0 program gyakorlati alkalmazásait mutatja be. A szerző a [8, 9] irodalmakat alkalmazza, amely a MATLAB® 6.5 verziójú programcsomag alkalmazását jelenti.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerekkel szemben támasztott üzembiztonsági, repülésbiztonsági, és minőségi követelményeket a [6, 10] források adják meg, amelyek közül a [10] irodalom összefoglaló jelleggel taglalja számos más, korábbi katonai szabvány, pl. a MIL-F-8785C szabvány követelményrendszerét.

A szerző csak az ún. kismagasságú repülések vizsgálatára korlátozza a tevékenységét, és az ún. „C” kategóriájú repülési fázisok, repülési feladatok (pl. felszállás, megközelítés, leszállás, kismagasságú terepkövetés stb.) [10].

Pokorádi, L. megadja a matematikai modellek osztályozását, amely jól alkalmazható a technikai rendszerek műszaki állapotának diagnosztikai célú vizsgálatára [11].

A szerző bemutatja a légköri turbulencia függőleges összetevőjének sztochasztikus idősorát, és vizsgálja azok statisztikai jellemzőit is. Az idősorokat a szerző különféle időjárási feltételek mellett vizsgálta, és megállapította, hogy az időjárási feltételek nagyban befolyásolják a sztochasztikus idősorok statisztikai jellemzőit [12].

III. A LÉGKÖRI TURBULENCIA MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

Az automatikus repülésszabályozás elméletében és gyakorlatában a légköri turbulencia modellezése területén széles körben alkalmazzák a sűrűség-függvény módszert [3, 4, 5, 6]. A leggyakrabban a Kármán-, vagy a Dryden-modellt szokás alkalmazni. A Kármán-féle matematikai modell pontosabb leírását adja a turbulencia regisztrátumainak, ezért a gyakorlatban szélesebb körben alkalmazzák. A Kármán-féle turbulencia modell sűrűség függvényét a következő egyenlettel lehet megadni [3, 4, 5, 6, 10]:

$$\Phi_{Kármán}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{1 + \frac{8}{3}(1,339L\Omega)^2}{(1 + 1,339L^2\Omega^2)^{11/6}}, \quad (3.1)$$

ahol L [m] a turbulencia-lépték, $\Omega = \omega U_0^{-1}$ [rad/m] a térbeli körfrekvencia, ω [rad/s] a megfigyelt körfrekvencia, és végezetül, σ [m/s] a turbulencia szórása (intenzitása).

A másik fontos matematikai modell a Dryden-féle turbulencia modell, amely egyszerűbb, viszont pontatlanabb leírását adja a légköri turbulenciának. E modell egyszerűségénél fogva széleskörű alkalmazást nyert, és az alábbi egyenlettel definiálható [5, 6]:

$$\Phi_{Dryden}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{1 + 3L^2\Omega^2}{(1 + L^2\Omega^2)^2}. \quad (3.2)$$

Tekintettel arra, hogy nem törekszünk a turbulencia által keltett aeroelasztikus lengések leírására, így megelégszünk az egyszerűbb Dryden-modell alkalmazásával.

A [3, 4, 5, 6, 10, 12] szakirodalmak a légköri turbulencia test-koordináta rendszer tengelyeire vetített sebességi összetevőire az alábbi sűrűség-függvényeket adják meg:

$$\Phi_{u_g}(\Omega) = \frac{2\sigma_u^2 L_u}{\pi} \frac{1}{1 + (L_u\Omega)^2}, \quad (3.3)$$

$$\Phi_{v_g}(\Omega) = \frac{\sigma_v^2 L_v}{\pi} \frac{(1 + 3(L_v\Omega)^2)}{[1 + (L_v\Omega)^2]^2}, \quad (3.4)$$

$$\Phi_{w_g}(\Omega) = \frac{\sigma_w^2 L_w}{\pi} \frac{(1 + 3(L_w\Omega)^2)}{[1 + (L_w\Omega)^2]^2}. \quad (3.5)$$

ahol $\sigma_i^2 = \int_0^\infty \Phi_i(\Omega) d\Omega_i \Big|_{i=u,v,w}$. Ismeretes, hogy

$$\omega = U_o \Omega, \quad (3.6)$$

ezért a (3.3)–(3.5) egyenleteket az alábbi alakban is felírhatjuk [3, 4, 5, 6, 10]:

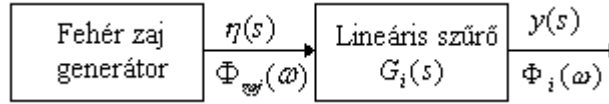
$$\Phi_{u_g}(\omega) = \frac{2\sigma_u^2 L_u}{U_o \pi} \frac{1}{\{1 + (L_u/U_o)^2 \omega^2\}}, \quad (3.7)$$

$$\Phi_{v_g}(\omega) = \frac{\sigma_v^2 L_v}{U_o \pi} \frac{(1 + 3(L_v/U_o)^2 \omega^2)}{\{1 + (L_v/U_o)^2 \omega^2\}^2}, \quad (3.8)$$

$$\Phi_{w_g}(\omega) = \frac{\sigma_w^2 L_w}{U_o \pi} \frac{(1 + 3(L_w/U_o)^2 \omega^2)}{\{1 + (L_w/U_o)^2 \omega^2\}^2}. \quad (3.9)$$

A megadott statisztikai jellemzőkkel bíró sztochasztikus jeleket úgy állíthatunk elő, ha egy előre megadott, $G_i(s)$ átviteli függvényű, lineáris szűrő bemenetére korlátozatlan, $\Phi_{\dot{x}_i}(\omega)$ sűrűség-függvényű, ideális fehér zajt kapcsolunk. A szűrő paramétereit úgy kell megválasztani, hogy annak kimeneti jele a keresett $\Phi_i(\omega)$ legyen, amelynek statisztikai jellemzői éppen az általunk szükségesnek

vélt paraméterekkel rendelkezzen. A sztochasztikus jel létrehozásának folyamatát a 3.1. ábra szemlélteti.



3.1. ábra. Sztochasztikus jelek előállítása.

A szűrő kimeneti jelének sűrűség-függvénye az alábbi összefüggés alapján számítható [2, 3, 6]:

$$\Phi_i(\omega) = |G_i(s)|_{s=j\omega}^2 \Phi_{\xi j}(\omega) = G_i(s) G_i(-s)|_{s=j\omega} \Phi_{\xi j}(\omega). \quad (3.10)$$

Ha a fehér zaj generátor ideálisnak mondott, vagyis sávkorlátozatlan jeleket állít elő, akkor igaz, hogy [1]:

$$\Phi_{\xi j}(\omega) = 1. \quad (3.11)$$

Ebben az esetben a (3.10) egyenlet az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$\Phi_i(\omega) = |G_i(s)|_{s=j\omega}^2 \Phi_N(\omega) = G_i(s) G_i(-s)|_{s=j\omega}. \quad (3.12)$$

A lineáris szűrő $G_i(s)$ átviteli függvényének alakjaira a [6] irodalom az alábbi egyenleteket adja meg:

$$G_{u_g}(s) = \frac{\sqrt{K_u}}{s + \lambda_u}, \quad G_{v_g}(s) = \sqrt{K_v} \frac{s + \beta_v}{(s + \lambda_v)^2}, \quad G_{w_g}(s) = \sqrt{K_w} \frac{s + \beta_w}{(s + \lambda_w)^2}, \quad (3.13)$$

ahol:

$$K_u = \frac{2U_o \sigma_u^2}{L_u \pi}, \quad K_v = \frac{3U_o \sigma_v^2}{L_v \pi}, \quad K_w = \frac{3U_o \sigma_w^2}{L_w \pi}, \quad (3.14)$$

$$\beta_v = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_v}, \quad \beta_w = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_w}, \quad (3.15)$$

$$\lambda_u = \frac{U_o}{L_u}, \quad \lambda_v = \frac{U_o}{L_v}, \quad \lambda_w = \frac{U_o}{L_w}. \quad (3.16)$$

Könnyen belátható, hogy a lineáris szűrők (3.13) átviteli függvényeit behelyettesítve a (3.12) egyenletbe éppen a Dryden-féle (3.7)–(3.9) megfelelő sűrűség-függvényeket kapjuk.

A továbbiakban feltételezzük, hogy az általunk vizsgált légi jármű kismagasságú, alacsony sebességű repülést hajt végre. Legyenek a kiindulási repülési paraméterek az alábbiak:

$$H = 100 \text{ m} \cong 328,084 \text{ láb}; \quad U_o = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}^{10}. \quad (3.17)$$

¹⁰ 1 láb \cong 0,3048 m — 1 m \cong 3,28084 láb. Bár e mértékegység nem tartozik az SI-rendszerhez, alkalmazása az angolszász mértékegység rendszerben széleskörű, repülésben történő alkalmazása miatt pedig megkerülhetetlen.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A (3.14)-(3.16) egyenletek alapján könnyen belátható, hogy a (3.13) átviteli függvények pontos felírásához – a (3.17) repülési paraméterek ismerete mellett – elengedhetetlenül szükséges a test-koordináta rendszer tengelyeire vett L_i turbulencia-léptékek, valamint az egyes σ_i turbulencia intenzitások ismerete.

A turbulencia intenzitások [5] szerint az alábbi NASA-adatokkal adhatók meg:

$$\sigma_u \text{ a repülőgép } OX \text{ hossz tengelye mentén: } 3,4 \text{ m/s} \leq \sigma_u \leq 0,85 \text{ m/s}, \quad (3.18)$$

$$\sigma_v \text{ a repülőgép } OY \text{ kereszt-tengelye mentén: } 2,8 \text{ m/s} \leq \sigma_v \leq 0,7 \text{ m/s}, \quad (3.19)$$

$$\sigma_w \text{ a repülőgép } OZ \text{ függőleges tengelye mentén: } 1,8 \text{ m/s} \leq \sigma_w \leq 0,45 \text{ m/s}. \quad (3.20)$$

McLean, D. szerint – extrém időjárási feltételek (erős vihar) esetére – igazak az alábbi turbulencia intenzitások [6, 10]:

$$\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w = 7 \text{ m/s}. \quad (3.21)$$

A kismagasságú légköri turbulencia L_i léptékeit – $10 \text{ láb} \leq b \leq 1000 \text{ láb}$ repülési magasságok esetén – az alábbi összefüggések szerint számíthatjuk [10]:

$$L_u = 2L_v = \frac{b}{(0,177 + 0,000823 \cdot b)^{1,2}}, \quad L_w = 0,5b. \quad (3.22)$$

McLean, D. szerint – extrém időjárási feltételek (erős vihar) esetére – igazak az alábbi turbulencia léptékek [6, 10]:

$$L_u = L_v = L_w = 580 \text{ m}. \quad (3.23)$$

A légköri turbulencia állandó összetevőjének sebességét – különféle időjárási viszonyokra a [10] katonai szabvány adja meg, grafikus alakban, az egyes sebességek előfordulásának valószínűsége függvényében. Kismagasságú turbulencia-modellek esetén igaz, hogy a turbulencia függőleges sebességi összetevőjének σ_w intenzitása a következő összefüggés alapján is kiszámítható [10]:

$$\sigma_w = 0,1 u_{20}, \quad (3.24)$$

ahol u_{20} a turbulencia állandó hosszirányú sebességi összetevője $b = 20 \text{ láb}$ repülési magasságon.

A (3.17)–(3.23) összefüggések alapján a turbulencia léptékek már könnyen kiszámíthatóak, és az 1. Táblázatban találjuk őket.

1. Táblázat. A turbulencia-lépték értékei $H = 100 \text{ m} \cong 328,084 \text{ láb}$ esetén.

Turbulencia lépték	Nominális (Nom)	Extrém (Worst Case)
L_u	862,185497 láb \cong 262,7941311 m	580

$L_v = 0,5 L_u$	$431,0927485 \cong 131,3970655 \text{ m}$	580
L_w	50	580

A A (3.17)–(3.24) képletek alapján a turbulencia intenzitások könnyen kiszámíthatóak, és a 2. Táblázatban foglaltuk őket össze.

2. Táblázat. A turbulencia intenzitások értékei.

Turbulencia intenzitások	Minimális (Min)	Maximális (Max)	Extrém (Worst Case)
σ_u , [m/s]	0,85	3,4	7
σ_v , [m/s]	0,7	2,7	7
σ_w , [m/s]	0,45	1,8	7

A 2. Táblázat, valamint a (3.24) egyenlet alapján a légköri turbulencia állandó hosszirányú sebességi összetevője a 3. Táblázatban található.

3. Táblázat. Az u_{20} sebesség értékei.

Légköri turbulencia jellemzői	Minimális (Min)	Maximális (Max)	Extrém (Worst Case)
$\sigma_w = 0,1 u_{20}$, [m/s]	0,45	1,8	7
u_{20} , [m/s] – [km/h]	4,5 – 16,2	18 – 64,8	70 – 252

A lineáris szűrők (3.13) egyenletekkel megadott átviteli függvényeinek – a (3.17) feltételek mellett – az 1. és a 2. Táblázatokban megadott paraméterek alapján számított paramétereit a 3., 4., és az 5. Táblázatban foglaltuk össze. A számítások során a turbulencia intenzitás úgy minimális, mint maximális értékeihez a turbulencia érték nominális értékét vettük figyelembe.

3. Táblázat. A lineáris szűrők paraméterei – $u_g(t)$ előállítása

Szűrő paraméterek	$K_u = \frac{2 \sigma_u^2 U_o}{L_u \pi} [s^{-1}]$	$\lambda_u = \frac{U_o}{L_u} [s^{-1}]$
Min	0,043756496	0,095131547

Max	0,700103937	0,095131547
Extrém	1,344584864	0,043103448

4. Táblázat. A lineáris szűrők paraméterei – $v_g(t)$ előállítás

Szűrő paraméterek	$K_v = \frac{3\sigma_v^2 U_o}{L_v \pi} [s^{-1}]$	$\beta_v = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_v} [s^{-1}]$	$\lambda_v = \frac{U_o}{L_v} [s^{-1}]$
Min	0,089027057	0,109848449	0,190263095
Max	1,324504595	0,109848449	0,190263095
Extrém	8,902705783	0,024885787	0,043103448

5. Táblázat. A lineáris szűrők paraméterei – $w_g(t)$ előállítás

Szűrő paraméterek	$K_w = \frac{3\sigma_w^2 U_o}{L_w \pi} [s^{-1}]$	$\beta_w = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_w} [s^{-1}]$	$\lambda_w = \frac{U_o}{L_w} [s^{-1}]$
Min	0,096686627	0,288675134	0,5
Max	1,546986047	0,288675134	0,5
Extrém	2,016877296	0,024885787	0,043103448



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

A (3.13) átviteli függvények – a 3., 4., és az 5. Táblázatok adatait felhasználva – most az alábbi módon írhatók fel:

$$G_{u_g}^{Min}(s) = \frac{0,20918}{s+0,09513}; G_{u_g}^{Max}(s) = \frac{0,83672}{s+0,09513}, G_{u_g}^{Extr}(s) = \frac{1,15956}{s+0,04310}, \quad (3.25)$$

$$G_{v_g}^{Min}(s) = 0,29837 \frac{s+0,10984}{s^2+0,38052s+0,03620}, G_{v_g}^{Max}(s) = 1,15087 \frac{s+0,10984}{s^2+0,38052s+0,03620}, \quad (3.26-a)$$

$$G_{v_g}^{Extr}(s) = 2,98374 \frac{s+0,02488}{s^2+0,08620s+0,00186} \quad (3.26-b)$$

$$G_{w_g}^{Min}(s) = 0,31094 \frac{s+0,28867}{s^2+s+0,25}, G_{w_g}^{Max}(s) = 1,24377 \frac{s+0,28867}{s^2+s+0,25} \quad (3.27-a)$$

$$G_{w_g}^{Extr}(s) = 1,42016 \frac{s+0,02488}{s^2+0,08620s+0,00185} \quad (3.27-b)$$

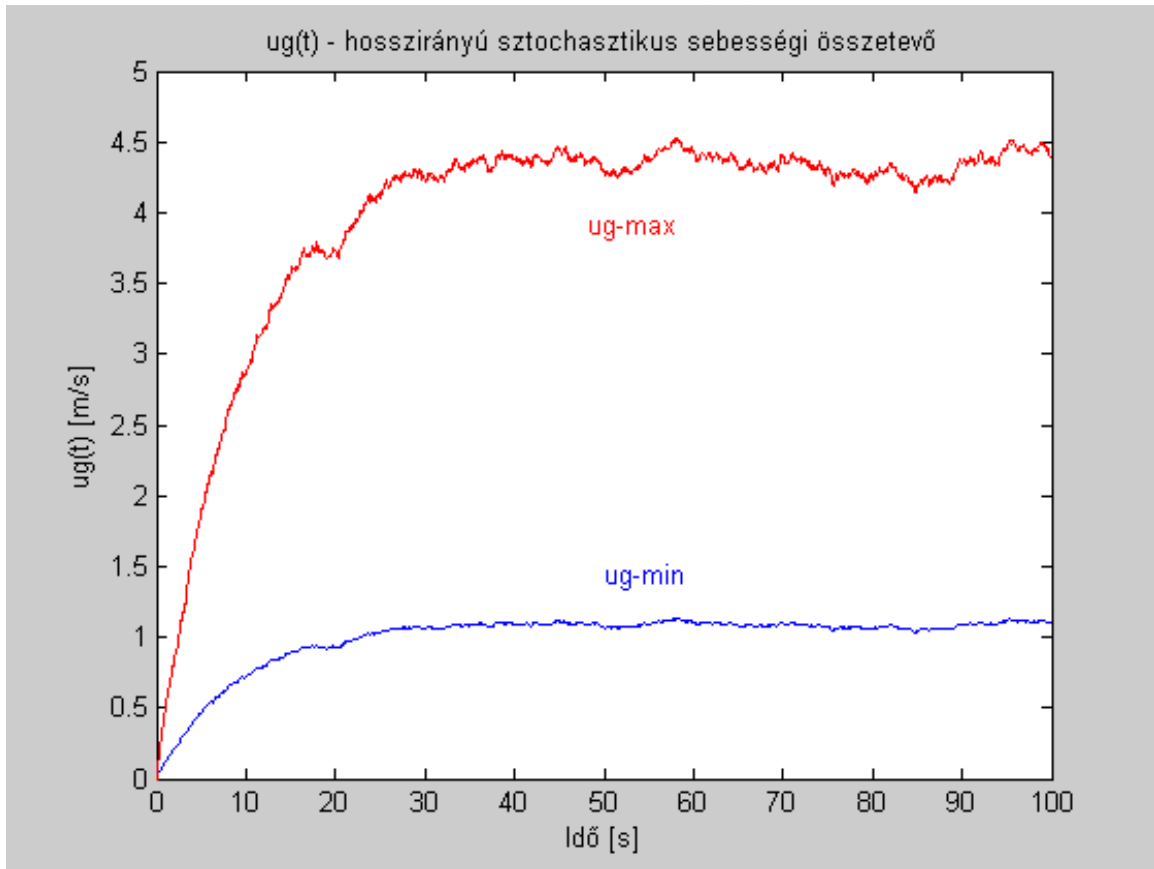
A (3.25)–(3.27) lineáris szűrők segítségével egy megadott statisztikai jellemzőkkel bíró véletlen idősorból az automatikus repülésszabályozási rendszerek analízise, és előzetes tervezése során nélkülözhetetlen idősorok már könnyen létrehozhatóak.

IV. A LÉGKÖRI TURBULENCIA SZTOCHASZTIKUS IDŐSORAI

A 3.1. ábrán látható rendszer segítségével, támaszkodva a szűrők átviteli függvényeit megadó (3.10)–(3.16), valamint a légköri turbulencia jellemzőit definiáló (3.17)–(3.27) egyenletekre a szerző MATLAB[®] forráskódot készítette. A számítógépes szimuláció eredményei a 4.1.–4.6. ábrákon látható [7, 8, 9].

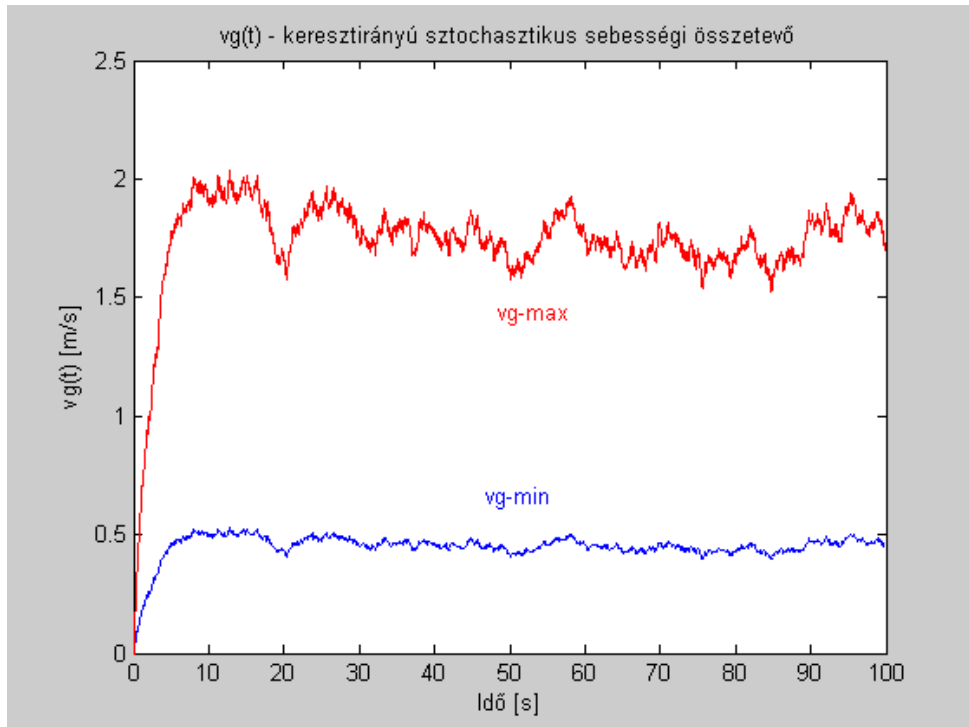
A 4.1. ábrán a légköri turbulencia hosszirányú (hátszél, vagy ellenszél) sebességi összetevőjének NASA-adatok statisztikai adatok alapján számított idősorai láthatóak.

A 4.1. ábra alapján könnyen belátható, hogy a hosszirányú sztochasztikus sebességi összetevő maximális értéke $\approx 4,2$ m/s sebességgel változik a felfutás után. Ha a repülés ellenszélben történik, főleg kis repülési sebességek esetén ez a sebesség akár a repülőgép sebességének kritikus értékű csökkenését, végső esetben, akár az átesését is eredményezheti, ami akár a repülőgép lezuhanásához, és elvesztéséhez is vezethet.



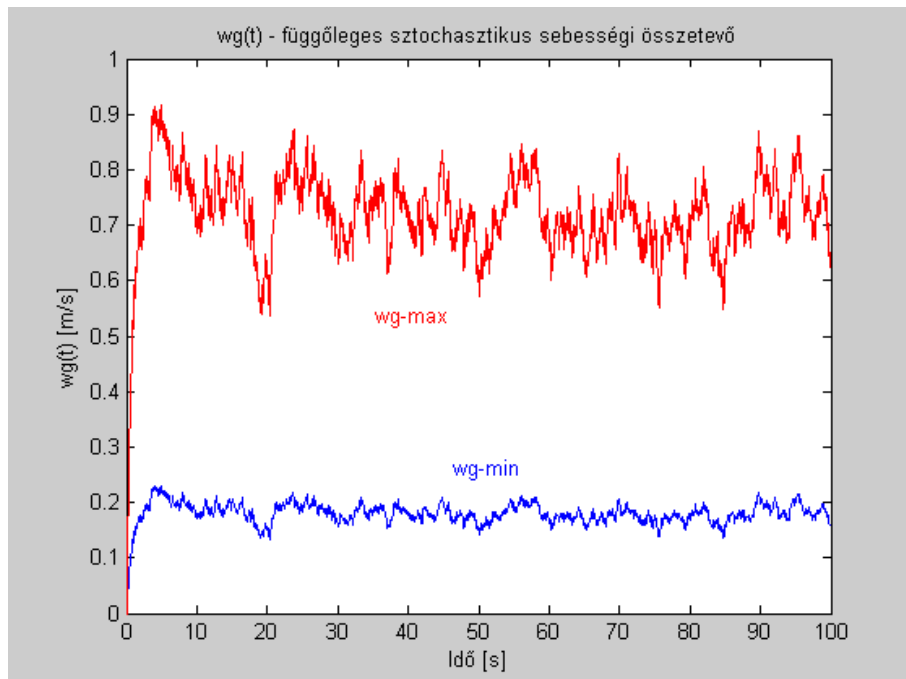
4.1. ábra. A légköri turbulencia hosszirányú sebességi összetevője.

A 4.2. ábrán a légköri turbulencia keresztirányú sebességi összetevőjének időszora látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a maximális sebességi érték esetén a keresztirányú sebesség, a felfutás után $\approx 1,7$ m/s sebességgel változik. Ez azt jelenti, hogy a repülőgép gyorsan eltér a megadott repülési iránytól, ami – számos repülési feladat végrehajtása során – nem megengedett.



4.2. ábra. A légekőri turbulencia keresztirányú sebességi összetevője.

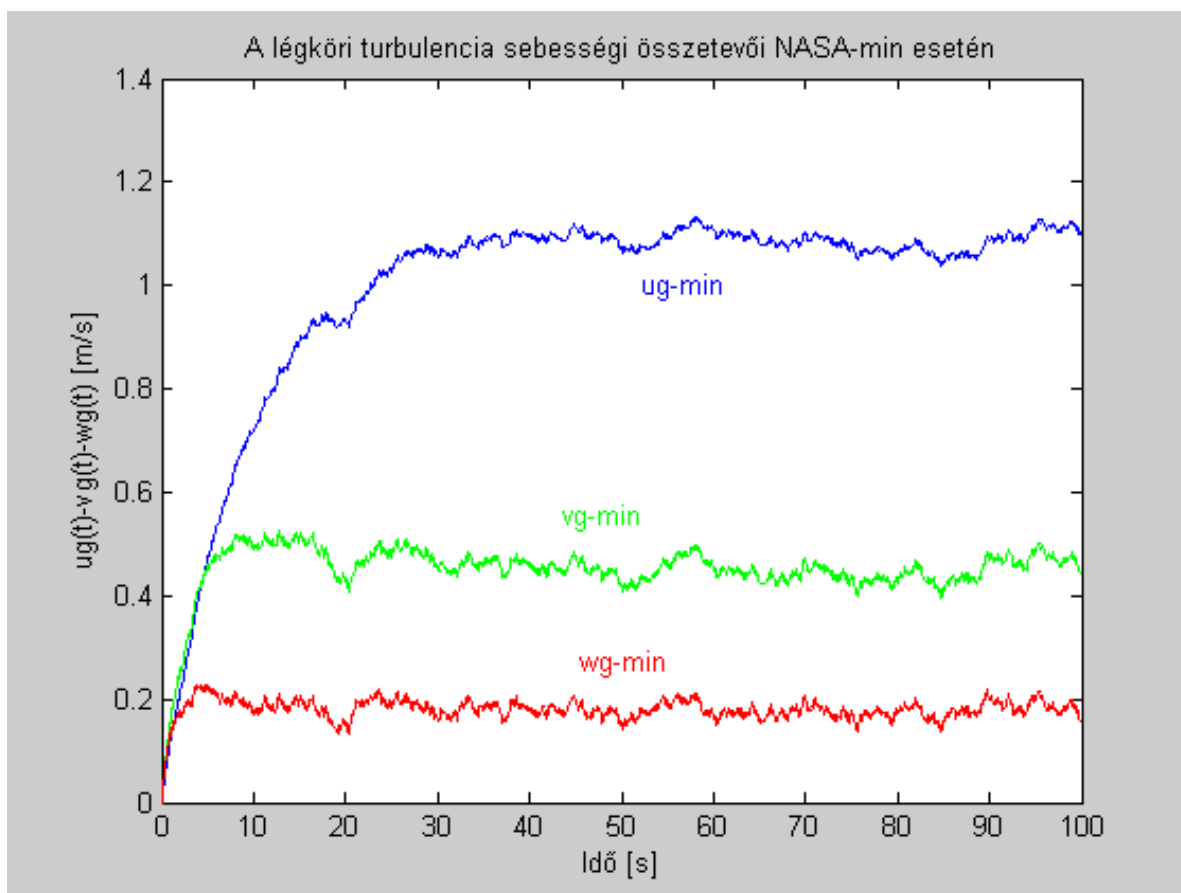
A 4.3. ábrán a légekőri turbulencia függőleges sebességi összetevőjének időszora látható.



4.3. ábra. A légekőri turbulencia függőleges sebességi összetevője.

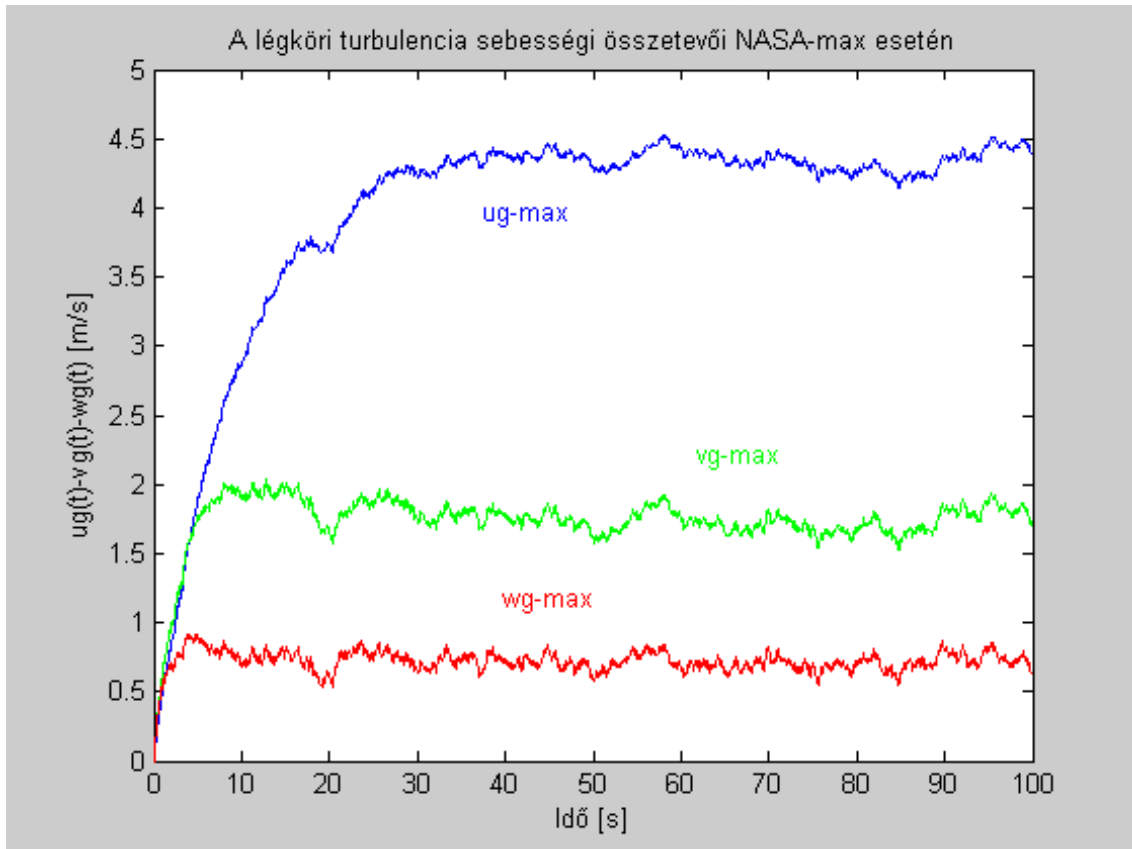
A 4.3. ábrán jól látható, hogy a légköri turbulencia statisztikai jellemzőinek maximális értékei esetén a függőleges sebesség $\approx 0,7$ m/s értékkel változik. Könnyen belátható, hogy már 10 sec alatt is kb. 7 m-el változik a repülési magasság. A gyakorlatban az emelkedő, vagy a földfelszín felé közel függőlegesen lefelé haladó levegőáramlások (pl. microburst esetén) tehát számottevően változtatják meg a repülési magasságot.

A gyakorlatban szükséges az egyes sebességi összetevők egyidejű ismerete és azok hatásának egyidejű vizsgálata. A 4.4. ábrán a légköri turbulencia sebességi összetevőinek idősorai láthatóak NASA-min statisztikai jellemzők mellett.



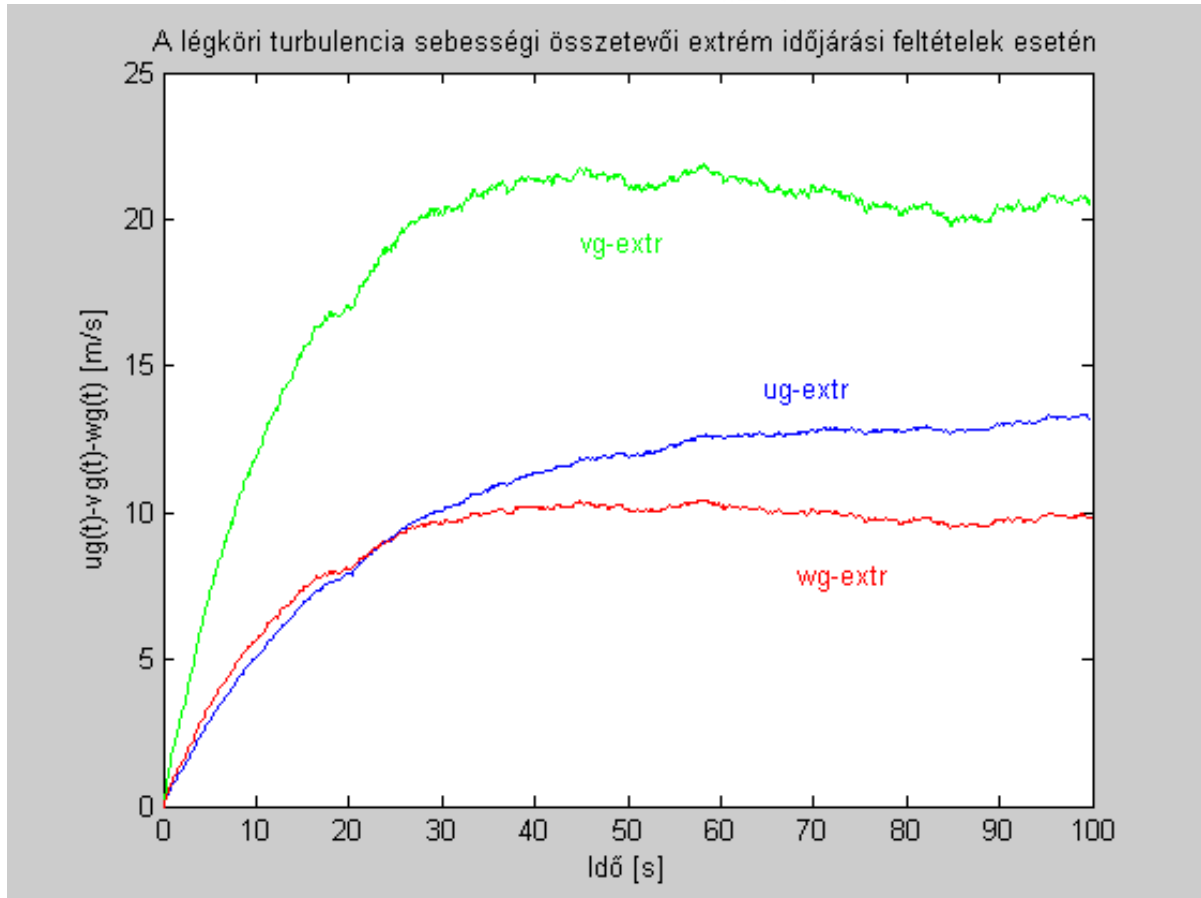
4.4. ábra. A légköri turbulencia sebességi összetevői NASA-min feltételek esetén.

Hasonlóképpen, a 4.5. ábrán a légköri turbulencia sebességi összetevőinek idősorai láthatóak NASA-max statisztikai jellemzők mellett.



4.5. ábra. A légekőri turbulencia sebességi összetevői NASA-max feltételek esetén.

Bár a gyakorlatban a repülések korlátozottak az időjárásí minimumok (pl. szél, csapadék, látótávolság stb.) függvényében, az extrém időjárásí feltételek vizsgálata még sem elhanyagolható, ugyanis a repülések során, ilyen nem számított környezeti feltételek mégis előfordulhatnak. A légekőri turbulencia McLean, D. által – extrém viharos időjárásí feltételekre megadott – sebességi összetevői a 4.6. ábrán láthatóak [6].



4.6. ábra. A légköri turbulencia sebességi összetevői extrém feltételek esetén.

A 4.6. ábra alapján könnyen belátható, hogy a repülőgép repülési feltételei, a repülőgép stabilitási feltételei – a turbulenciába történő berepülés után – nagyon gyorsan romlanak. Természetesen, e folyamatok hatása csökkenthető, de nem küszöbölhető ki maradéktalanul. Eme hatások kiküszöbölésére kínálkozik egy régi mondás, amely, bár eredetét tekintve a katonai repülésben keletkezett, mégis jól alkalmazható bármilyen típusú, és bármilyen rendeltetésű repülőgépre: „a termik a vitorlázó repülők vágyálma, és a vadászrepülők rémálma”. Vagyis, a legjobb elkerülni a turbulens zónákat, mivel a sztochasztikus jelleg miatt bármikor akár rosszabbak is lehetnek a repülés feltételei.

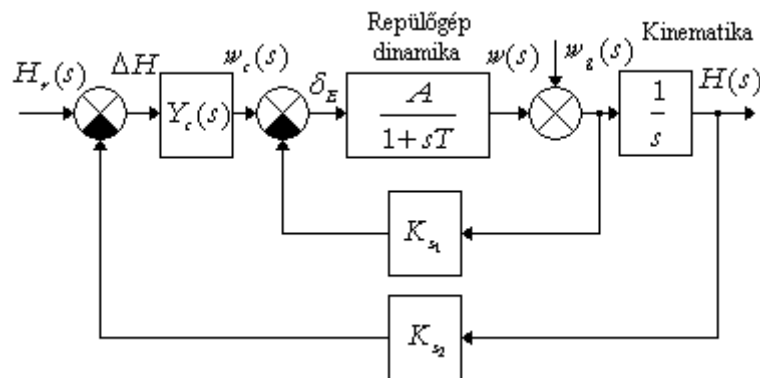
A fent elhangzottak alapján elmondható: a repülések automatizálása során célszerű csillapító automatákat, valamint automatikus repülésszabályozó rendszert tervezni, és telepíteni a repülőgépek fedélzetére.

A fejezet – terjedelmi korlátok miatt – vizsgálatainkat a repülési magasság vizsgálatára korlátozza. Mindazonáltal, a bemutatott, és alkalmazott módszer kiterjeszhető, és alkalmazható más szabályozási rendszerekre is.

V. A REPÜLÉSI MAGASSÁGSTABILIZÁLÓ RENDSZER ALAPJEL KÖVETÉSÉNEK, ÉS ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezésére számos hagyományos (pl. Bode-módszer, Ziegler-Nichols módszer, Kessler-módszer, gyök-helygörbe módszer), valamint számos modern eljárás (pl. LQR módszer, LQG-módszer, LQG/LTR módszer, H_2 -módszer, H_2LQG -módszer, H_∞ -módszer, μ -szintézis módszer stb.). A fejezet célja megvizsgálni, hogy a kereskedelmi forgalomban is kapható, és a repülőgép típusától függetlenül a fedélzetre beépíthető, de utólagos hangolást igénylő robotpilóták (pl. MP2000, MP2028) milyen módon alkalmazhatóak?!

A magasságstabilizáló rendszerek feladata a repülési magasság állandó értéken tartása, vagy megadott algoritmus szerinti megváltoztatása függetlenül a külső, vagy a belső zajoktól. Egy hipotetikus repülőgép magasságstabilizáló rendszere a 5.1. ábrán látható. A szabályozási rendszerben alkalmazott jelölések az alábbiak: $Y_c(s)$ - soros szabályozó, H_r - a repülési magasság referencia értéke, H - a repülési magasság pillanatnyi értéke, ΔH - a repülési magasság stabilizálásának hibajele, $w_c(s)$ - a belső szabályozási hurok referencia jele, $w(s)$ - a függőleges sebesség, $w_g(s)$ - külső zavarás, a légköri turbulencia függőleges sebességi összetevője, A - a repülőgép erősítési tényezője, T - a repülőgép időállandója, K_{s_1} - a sebességmérő átviteli függvénye, és végezetül, K_{s_2} - a magasságmérő átviteli függvénye.



5.1.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer hatásvázlata.

További vizsgálataink során az 5.1. ábrán látható magasságstabilizáló rendszer az alábbi átviteli függvényekkel rendelkezik:

$$Y_{A/C}(s) = \frac{w(s)}{\delta_E(s)} = \frac{A}{1+sT} = \frac{2,5}{1+0,5s}, \quad (5.1)$$

$$K_{s_1} = 0,7; K_{s_2} = 1, \quad (5.2)$$

További vizsgálataink során három statikus szabályozót vizsgálunk meg, a melyek rendre arányos (P-), arányos-integráló (PI-), és arányos-integráló-differenciáló (PID-) típusúak. Ennek megfelelően legyenek a soros kompenzátor átviteli függvényei az alábbiak:

$$Y_c|_P = 5, Y_c|_{PI} = 5 + \frac{1}{s}, Y_c|_{PID} = 5 + \frac{1}{s} + 1,5s. \quad (5.3)$$

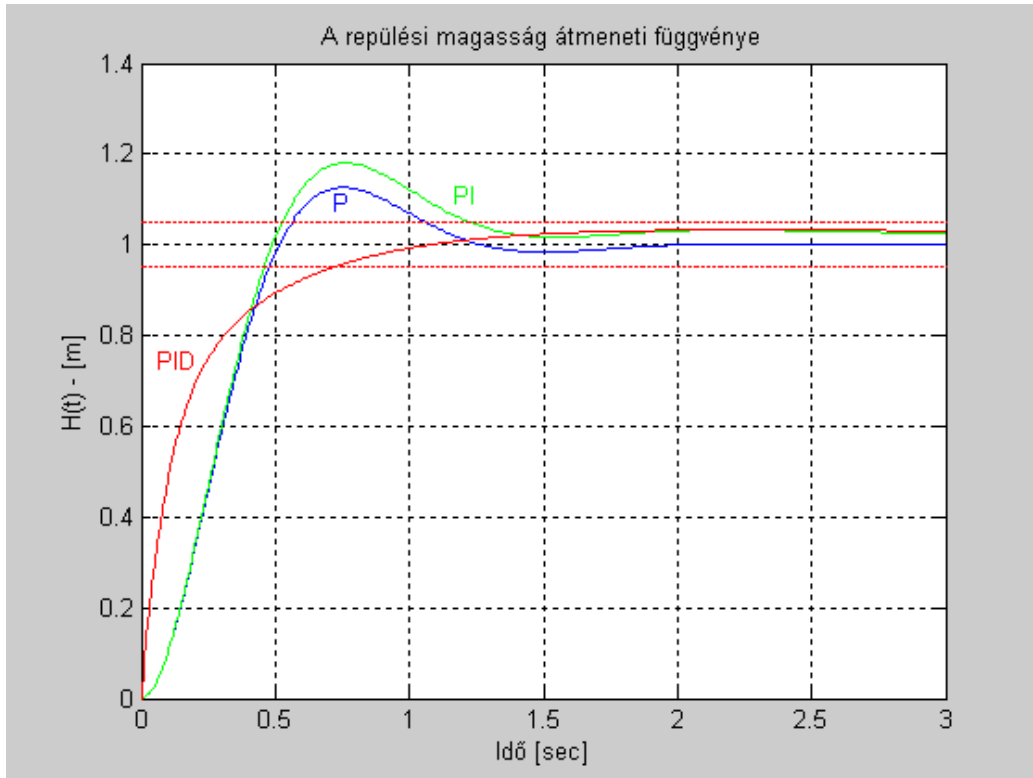
Ismeretes, hogy szabályozástechnikában a rendszerek vizsgálatát számos bemeneti jelre is el kell végezni. A terjedelmi korlátok miatt csak az egységugrás bemeneti jelre számított átmeneti függvényeket határoztam meg. Ismeretes, hogy az átmeneti függvény alapján a zárt szabályozási rendszer számos minőségi jellemzője is meghatározható [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9].

5.1. a MAGASSÁGSTABILIZÁLÓ RENDSZER ALAPJEL KÖVETÉSÉNEK VIZSGÁLATA.

Az 5.1. ábrán látható szabályozási rendszer átmeneti függvényének meghatározása során a bemeneti jel az alábbi volt [2]:

$$H_r(t)|_{w_g(t)=0} = 1(t). \quad (5.4)$$

A zárt szabályozási rendszer válaszjele, más szóval, az átmeneti függvény az 5.2. ábrán látható.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

5.2.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer átmeneti függvényei.

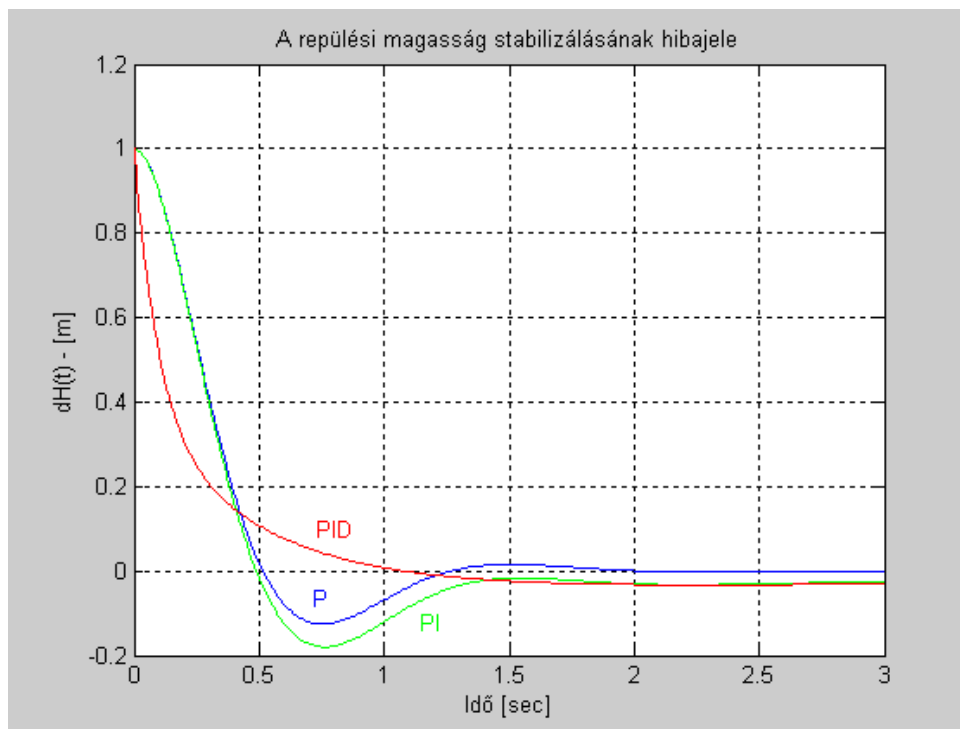
A zárt szabályozási rendszert mind a három, az (5.3) egyenlettel megadott szabályozó esetén megvizsgáltuk. Megállapítható, hogy a különféle szabályozó struktúrák alapvetően befolyásolják a minőségi jellemzőket. Az egyszerűség miatt, mi most csak a tranziens időre korlátozzuk a vizsgálatainkat, amelyek az alábbiak voltak:

$$t_{tr}|_P \cong 1,1s, \quad t_{tr}|_{PI} \cong 1,25s, \quad t_{tr}|_{PID} \cong 0,7s. \quad (5.5)$$

Az (5.5) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a soros P-szabályozó integráló (I) hatással történő kiegészítése a tranziens idő növekedését eredményezi. Ez a növekmény azonban, bizonyos minőségi követelmények esetén nem eredményezi a szabályozási rendszer paramétereinek a követelményrendszeren kívül kerülését. A másik dolog, amit megfigyelhetünk, hogy a repülési magasság stabilizálása statikus hibával történik. Más szóval, a repülési magasság stacioner értéke nem éri el a kívánt egységnyi értéket. Mindazonáltal, az integráló (I) hatás zavarelhárítás során mutatott előnyös tulajdonsága miatt széles körben nyer alkalmazást.

Szabályozástechnikából ismeretes, hogy a szabályozási rendszerek soros kompenzátoraiban alkalmazott differenciáló-hatás gyorsítja a rendszer működését, és javítja a minőségi jellemzőket. Nem szabad azonban szem elől téveszteni, hogy a differenciális mindig zajkiemelő hatású, így óvatosan kell bánni annak alkalmazásával [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10].

Az 5.3. ábrán az automatikus magasságstabilizáló rendszer statikus hibáinak idősorai látható.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

5.3. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer statikus hibái.

Az 5.3. ábrán jól látható, hogy az integráló szabályozás rontja a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőit, míg a differenciáló hatás gyorsítja a tranziens folyamatokat.

Összességében megállapítható, hogy a zárt szabályozási rendszer eleget tesz a működési feltételeknek, így a bemutatott PID-szabályozó jó eredménnyel alkalmazható a repülési magasság automatikus stabilizálására.

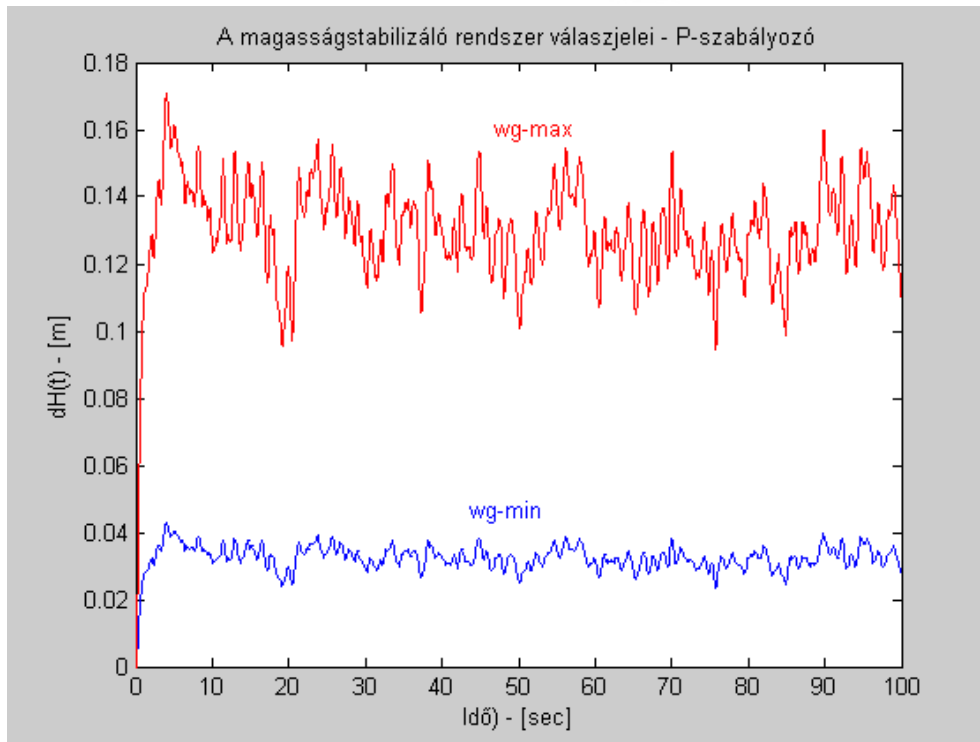
5.2. a MAGASSÁGSTABILIZÁLÓ RENDSZER ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA.

Érdekes területet képvisel a zárt szabályozási rendszer vizsgálata sztochasztikus bemeneti jel hatására. Jól ismert tény, hogy a repülés során a levegő – szinte – sohasem tekinthető nyugodtnak. Az előző fejezetekben bemutatott turbulencia modellek, illetve sztochasztikus idősorok jól alkalmazhatóak a zárt szabályozási rendszerek zavarelhárító képességének vizsgálata során. Eme feladat megoldása során – zérus értékű bemeneti jel mellett – a zárt szabályozási rendszer formális bemeneti jelének tekintjük a

$$w_g(t) \Big|_{H_r(t)=0}.$$

(5.6)

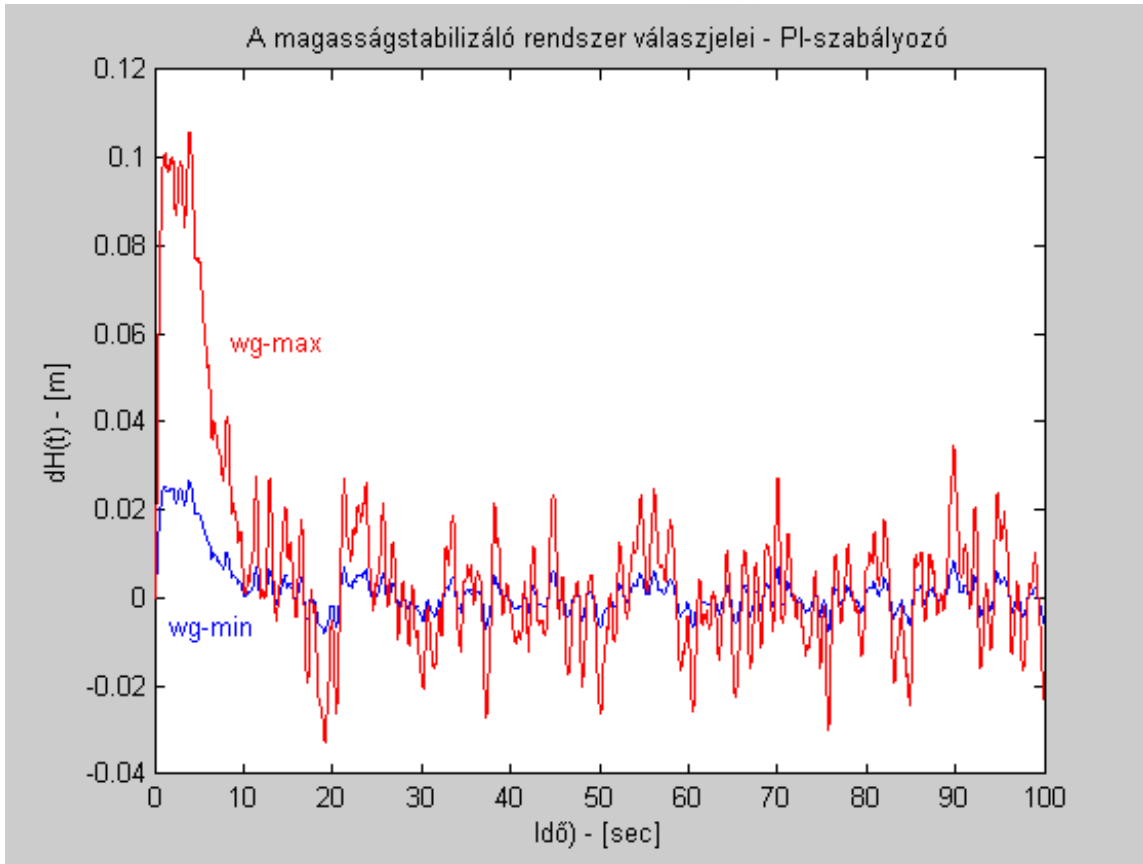
sztochasztikus jelet, amelyet különféle időjárási feltételek (kis értékű turbulencia, nagy értékű turbulencia, extrém turbulencia) mellett is meghatároztunk. A különféle szabályozókkal működő automatikus repülésszabályozó rendszerek válaszjelei az 5.4., 5.5., és az 5.6. ábrákon látható.



5.4. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válaszelei a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

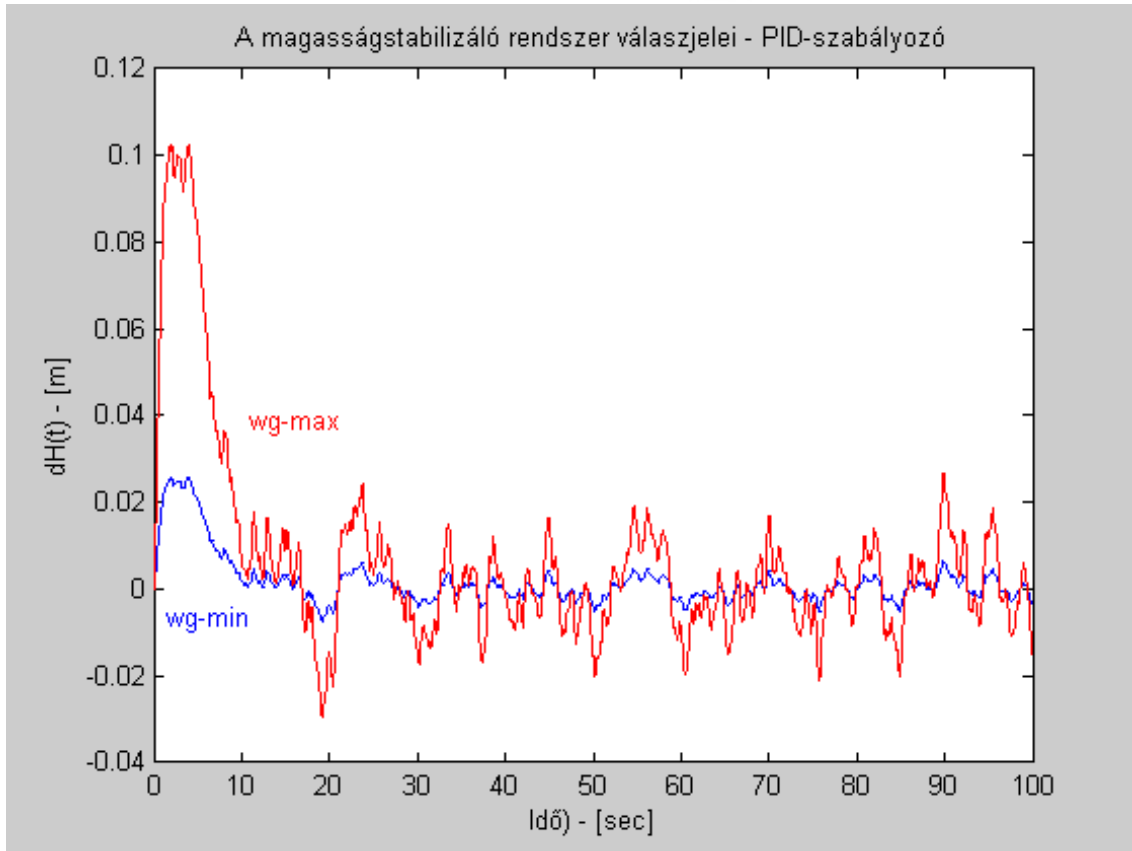
Az 5.4. ábrán jól látható, hogy az egyszerű P-szabályozó nem képes teljesen kiszűrni a sztochasztikus külső zavarás (függőleges szél) hatását, és az időjárási feltételek romlásával egyre nagyobb a rendszer kimeneti jele. Megemlíteni szükséges, hogy mosta rendszer valós bemeneti (referencia) jele zérusértékű. A statikus hiba nagyság előre vetíti, hogy a 5.4. ábrán látható jelek értéke olyan kicsi, hogy azt a magasságérzékelő – gyakran – nem is képes érzékelni. A gyakorlatban szintén sokszor fordul elő az is, hogy a magasságérzékelő kimeneti jelét, még a visszacsatoló ágban szűrik, és a turbulencia által okozott jelösszetevőt próbálják minimálni, esetleg teljesen kiszűrni.

Az 5.5. ábrán jól látható, hogy a PI-szabályozó alkalmazása miatt, bár a rendszer kimeneti jele nem csökken, a repülési magasság még a rosszabb időjárási feltételek mellett is, az ideális zérusértékű jel körül néhány szekundumos időállandóval leng. Stacioner állapotban a magasságváltozás mindössze néhány centiméter, ami elhanyagolhatóan kis értékű.



5.5. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válaszelei a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

Az 5.6. ábra alapján a PID-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerre hasonló megállapítások tehetőek, mint azt az előbb ismertettük.



5.6. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válaszelei a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

A gyakorlatban érdeklősére tarthat számot annak vizsgálata, hogy az egyes szabályozó típusok – különféle időjárási viszonyok mellett – hogyan látják el szabályozástechnikai feladataikat?! A 3. fejezetben megadott NASA-min, és NASA-max időjárási feltételek mellett a magasságstabilizáló rendszer válaszeleit az 5.7., és az 5.8. ábra mutatja be.

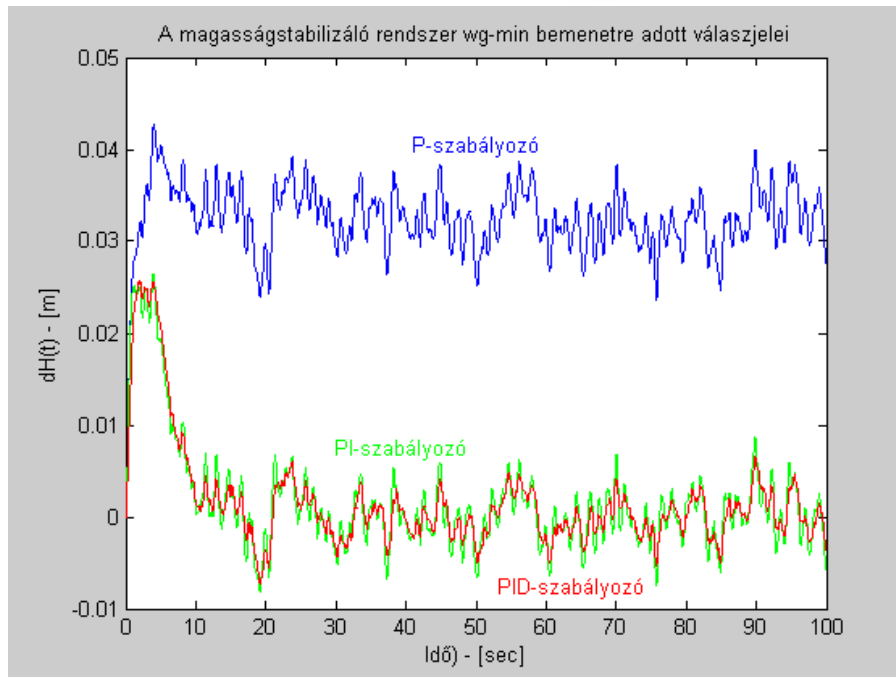


MAGYARORSZÁG MEGÚJUL

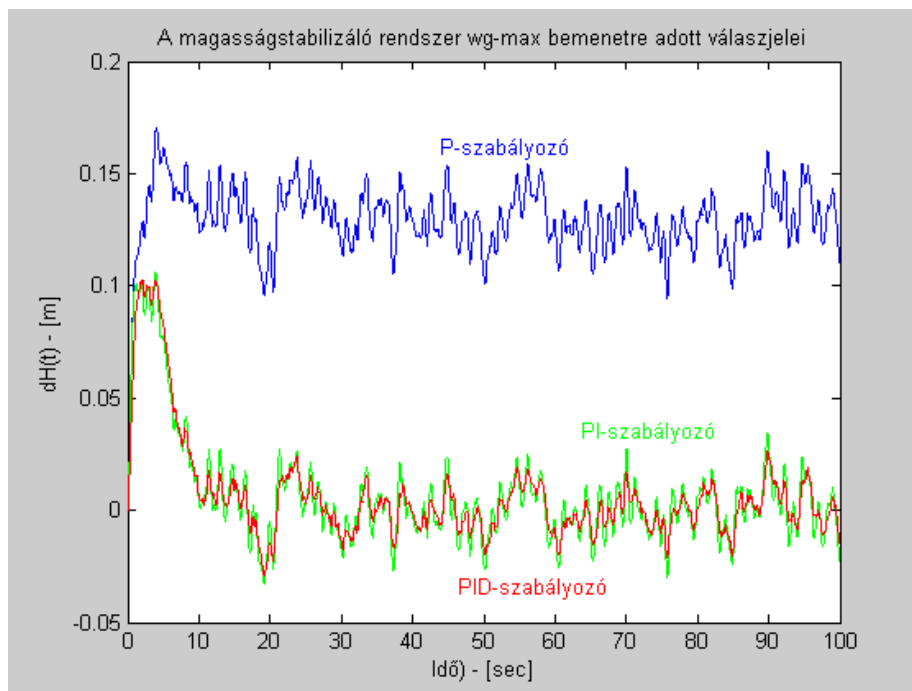


A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)



5.7. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.



5.8. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

Az 5.7. és az 5.8. ábrák alapján könnyen belátható, hogy még a rosszabb időjárási NASA-max feltételek mellett sem lesz nagy értékű a repülési magasság statikus hibája.

VI. SZÉLLÖKÉS ÉS TURBULENCIA-MODELLEK

A III. fejezetben a légköri turbulencia sztochasztikus modellezésére a NASA-féle modelleket alkalmaztuk [10, 12]. Természetesen, e matematikai modellek mellett számos más modell is létezik. Rohács és Simon számos más, a gyakorlatban használt légköri turbulencia-modellt ad meg az [5] irodalomban. E széllökés-, és turbulencia-modellek statisztikai jellemzőit az 1., 2., és a 3. Táblázat foglalja össze.

1. Táblázat – a turbulencia intenzitása [5]

Traident-repülőgépre	Kont-összefüggés	NASA-modell
$\sigma_w = 1,25 \cdot U_{DIN}^2$ $\sigma_v = 2,5 \cdot U_{DIN}^2$ $\sigma_u = 1,4 + 0,08 \cdot U_{DIN}$	$\frac{\sigma_w}{U_{DIN}} \approx \left(\frac{2}{L}\right)^{1/3}$	$0,85m/s \leq \sigma_u \leq 3,4m/s$ $0,7m/s \leq \sigma_v \leq 2,8m/s$ $0,45m/s \leq \sigma_u \leq 1,8m/s$

2. Táblázat – a turbulencia nagysága (Turbulencia-lépték) [5]

Boeing-modell	FAA (GB)	Kármán-modell	Dryden-modell
$L = c \cdot h$ $c \approx 1$ $h \leq 2,8m$	$L_w = \begin{cases} 5; & h \leq 10 \text{ m} \\ 0,5h; & 10 \leq h \leq 300 \text{ m} \\ 150; & h \geq 300 \text{ m} \end{cases}$ $\frac{L_v}{L_w} = \begin{cases} 1,3 - 0,002h; & h \leq 150 \text{ m} \\ 1; & h \geq 150 \text{ m} \end{cases}$	$L = L_u = 2L_w = 0,8h; h \leq 300 \text{ m}$ $L = L_u = 2L_w = 250; h \geq 300 \text{ m}$ $L_w = 0,5; h \leq 940 \text{ m}$ $L_u = 2L_v = 184 \cdot h^{1/3}; z \leq 940 \text{ m}$	$L_w = 0,5 h$ $L_u = z \cdot h_u = 145^{1/3}; h \leq 660 \text{ m}$

3. Táblázat – a szél állandó összetevője I. [5]

Az állandó összetevő modellje	A szélprofil statisztikai leírása		
$f(\omega) = \frac{\pi\omega}{2W_o} e^{-\frac{n}{4}\left(\frac{W}{W_o}\right)^z}$	Dobrolenszkij-modell	Blakard-modell	$W = W_{o1} = \frac{\ln \frac{z}{z_o} - \psi\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\ln \frac{100}{z_o} - \psi\left(\frac{100}{z_o}\right)}$
	$\frac{W_o}{W_{o1}} = \left(\frac{y_2}{y_{o1}}\right)^n$	$W = \frac{W_{din}}{K} \ln \frac{z}{z_o} + 144 f(z);$ $K = 0,4, z \leq 100 m$	
	Felületi érdesség figyelembevételének modellje	FAA előírás	
	$W = \frac{\bar{W}_{din}}{K} \ln \frac{z}{z_o} = \frac{W'_{din}}{K} \ln z;$ $W = W_o + 135 h; h \leq 113 m$	$W = W_{12} \left(\frac{h}{12}\right)^{1/3}; h \leq 19 m$	

3. Táblázat – a szél állandó összetevője II. [5]

Sűrűség-függvények		
Lumley-Panovszky modell	Lappe-modell	FAA modell
$S_{vv}(\Omega) = \frac{1180\sigma_k^2}{c^2[(1+2950\Omega)^{2/3}]}$	$S_{ii}(\Omega) = \delta_i^2 \frac{2\pi L}{(1+2\pi L\Omega)^2}$	$S \approx K^{5/3} W_c; K \geq 0,5L$ $S \approx K^{-1} W_c; K \leq 0,5L$
Lipman-modell	Kármán-modell	Dryden-modell
$S_{vv} = S_{uu} = \frac{L}{\pi} \frac{\sigma_\omega^2}{v} \frac{2}{1+(\omega L/v)^2}$ $S_{ww} = \frac{L}{\pi} \frac{\sigma_\omega^2}{v} \frac{1+3(\omega L/v)^2}{(1+(\omega L/v)^2)^2}$	$S_{vv}(\Omega) = S_{uu}(\Omega) = \sigma_\omega^2 \frac{L}{\pi} \frac{2}{(1+(1+1,339L\Omega)^2)^{3/5}}$ $S_{ww}(\Omega) = \sigma_\omega^2 \frac{L}{\pi} \frac{1+8/3 \cdot (1,339L\Omega)^2}{(1+(1+1,339L\Omega)^2)^{11/6}}$	$S_{uu}(\Omega) = \frac{2L}{\pi} \sigma_u^2 \frac{1}{1+(L\Omega)^2}$ $S_{vv}(\Omega) = \frac{L}{\pi} \sigma_v^2 \frac{1+3 \cdot (L\Omega)^2}{(1+(L\Omega)^2)^2}$ $S_{ww}(\Omega) = \frac{L}{\pi} \sigma_w^2 \frac{1+3 \cdot (L\Omega)^2}{(1+(L\Omega)^2)^2}$



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggazdálkodásban
(KOVÁSZ)

VII. AZ ÉRZÉKELŐK ZAJAINAK STATISZTIKAI JELLEMZŐI [12].

Az érzékelők mérési zaját a merev repülőgép kimeneti egyenletében szokás definiálni, amelyet az alábbi alakban írhatunk fel [12]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{v}, \quad (7.1)$$

ahol \mathbf{v} a szabályozási rendszer érzékelői sztochasztikus mérési zajainak vektora.

Megjegyezni szükséges, hogy a sztochasztikus mérési zajok statisztikai jellemzőiről meglehetősen kevés szakirodalom áll rendelkezésre.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerek analízise, és előzetes tervezése során a mérési zajokat Gauss–eloszlású sztochasztikus jelnek feltételezik. Ha a sűrűség–függvény nem ismert, akkor a lineáris szűrő időállandóját olyan értékre kell választani, hogy a zaj spektruma legalább egy nagyságrenddel nagyobb legyen, mint az automatikus repülésszabályozó rendszer spektruma. Általában feltételezik, hogy az érzékelők mérési zaja zérus középértékű stacionárius jel, vagyis statisztikai jellemzői állandóak, függetlenek az időtől.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerek számos hagyományos érzékelője pontatlanul érzékeli a mért repülési paramétert. Az egyes repülési paraméterek mérési hibája időben lassan változik, ezért gyakran egy repült óra időtartományra adják meg a statikus mérési hibákat.

A helyzetérzékelő (háromszabadságfokú) hagyományos, elektro–mechanikus giroszkópok egy repült órára számított statikus mérési hibája $0,1^\circ$ ($4,84 \cdot 10^{-7} \text{ rad/s}$). A hagyományos, elektro–mechanikus szögsebesség érzékelő (kétszabadságfokú giroszkóp) egy repült órára számított statikus hibája $0,1^\circ/\text{s}$ [12].

A gyorsulásmérők tipikus mérési hibája $3 \cdot 10^{-5}$ ($3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$), míg a gyorsulásmérők mérési zaja négyzetes középértéke általában 10^{-3} m/s^2 értékű. A barometrikus magasságmérők mérési zaja négyzetes középértéke tipikus értéke 16 m.

A hagyományos építésű repülőgépek repülésszabályozó rendszere mérési hibáit oly módon is csökkenthetjük, ha a szabályozási rendszerek visszavezető ágaiban jelformálást alkalmazunk. E módszer alkalmazásának hátránya, hogy a kiszűrni kívánt sztochasztikus mérési zaj spektrumát pontosan kell ismerni, ellenkező esetben az érzékelő hasznos kimeneti jelét is manipuláljuk, szűrjük, ami mindenképpen elkerülendő.

A modern repülőgépek általában inerciális navigációs rendszerrel (INS –Inertial Navigation System) rendelkeznek. Az INS rendszerek optikai rezonátorokat, vagyis lézergiroszkópokat alkalmaznak a szögsebesség mérésére. E jelek integrálásával, vagyis jelfeldolgozással kapjuk meg a repülőgép Euler–szögeit. A modern repülőgépek elektro–mechanikus giroszkópikus mérőrendszereket csak kivételes esetben, mint tartalék mérőrendszert alkalmaznak [12].

Az INS rendszerek gyorsulásmérőket tartalmaznak, amelyek érzékelik, és mérik a repülőgép test–koordináta rendszerének tengelyei mentén a lineáris gyorsulásokat. E jeleket integrálva kapjuk meg az egyes tengelyek mentén a sebességet, majd a sebességi jeleket integrálva kapjuk a koordinátákat, vagyis a megtett utat, a repülési magasságot, és az oldal–koordinátát kapjuk meg. Az INS rendszer sokszor magába foglalja a GPS rendszer jelfeldolgozó egységeit is. Az INS rendszerek jóval pontosabban képesek mérni az egyes repülési paramétereket, így – eltérően a fent ismertetettektől – lényegesen kisebb hibával mérik az egyes repülési paramétereket [12].

VIII. DETERMINISZTIKUS LÉGKÖRI TURBULENCIA-MODELLEK

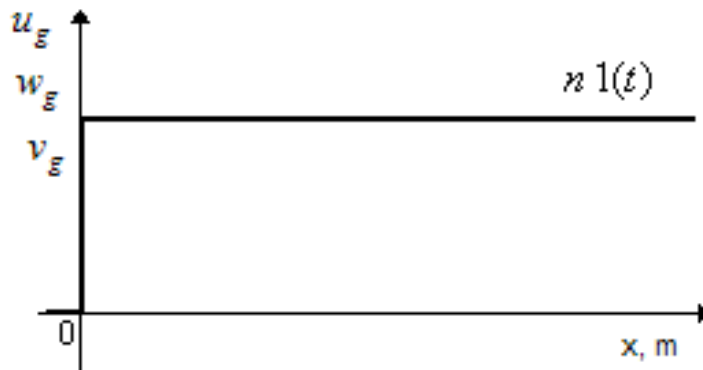
A merev repülőgépekre ható turbulencia determinisztikus matematikai modelljei közül az alábbiakat alkalmazzák széles körben [10, 12]:

1) Éles szélű széllökés

A turbulencia test-koordináta rendszer tengelyeire eső sebességi összetevői az alábbi egyenlet alapján számítható:

$$u_g = w_g = v_g = n_1(t). \quad (8.1)$$

A sebességi összetevő függvényei a 8.1. ábrán látható:



8.1. ábra. Az éles szélű széllökés sebességének profilja.

2) Fokozatos (lineáris) széllökés

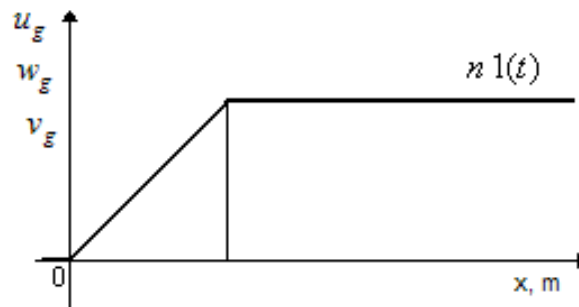
A fokozatos szél sebességi összetevői az alábbi egyenlet alapján számíthatóak:

$$u_g, w_g, v_g = 0, \text{ ha } x \leq 0, \quad (8.2)$$

$$u_g, w_g, v_g = kx, \text{ ha } 0 < x \leq x_{\max}, \quad (8.3)$$

$$u_g, w_g, v_g = u_{g\max}, w_{g\max}, v_{g\max}, \text{ ha } x > x_{\max}. \quad (8.4)$$

A fokozatos szél függvénye a 8.2. ábrán látható.



8.2. ábra. A lineáris szellökés sebességprofilja.

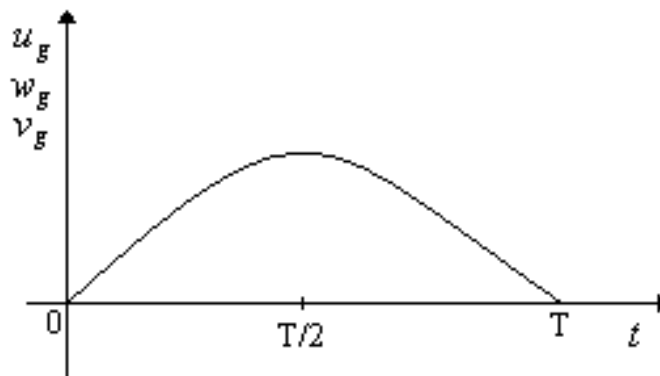
3) Az „1-cos” egyenletű léggöri turbulencia-modell

Az „1-cos” léggöri turbulencia-modell időfüggvénye a 8.3. ábrán látható. Az „1-cos” léggöri turbulencia-modell egyenlete az alábbi módon írható fel:

$$u_g, w_g, v_g = \frac{k}{T} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (8.5)$$

ahol a turbulencia T időtartama a következő összefüggés alapján számítható:

$$T = \frac{L}{U_o}. \quad (8.6)$$



8.3. ábra. Az 1-cos egyenletű turbulencia modell

A (8.6) egyenletben: L [m] az integrál léptéktényező, U_o [m/s] az egyensúlyi repülési sebesség. A (8.5) egyenletben szereplő k skalár együttható a megfelelő intenzitás létrehozását szolgálja. A gyakorlatban az integrál léptéktényező értékét az alábbi tapasztalati képlettel szokás meghatározni:

$$L = 25 \bar{c}. \quad (8.7)$$

A (8.7) összefüggés tapasztalati úton történő meghatározásakor abból a feltételezésből szokás kiindulni, hogy e zavarás főleg a repülőgép rövidperiodikus mozgását befolyásolja, és a repülőgépre ható terhelést alapvetően e tényező határozza meg.

Ha az L léptéktényező összes lehetséges értékét szeretnénk figyelembe venni, akkor a légköri turbulencia matematikai leírására statisztikai módszert kell alkalmazni, amelyek közül a gyakorlatban, széles körben alkalmazzák a sűrűség–függvény módszert [10, 12].

IX. KÖVETKEZTETÉSEK

A szerző a fejezetben:

- összefoglalta a légköri turbulencia matematikai modellezésére vonatkozó elméleti ismereteket;
- összefoglalta a NASA-min, NASA-max, illetve az extrém légköri jelenségek statisztikai jellemzőit;
- meghatározta a NASA-min, NASA-max, illetve az extrém légköri jelenségek idősorainak szűréséhez elengedhetetlenül szükséges lineáris szűrők paramétereit;
- MATLAB[®] környezetben létrehozta a légköri turbulencia sebességi összetevőinek idősorait;
- elvégezte a repülési magasságstabilizáló rendszer alapjel követésének vizsgálatát;
- elvégezte a repülési magasság stabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálatát;
- megállapította, hogy a szabályozóban alkalmazott integráló hatás rontja ugyan az alapjel követés minőségi jellemzőit, de lényeges mértékben javítja a zavarelhárítási képességet;
- a kereskedelmi forgalomban is kapható PID-szabályozók (pl. MP2000, MP2028) eredményesen alkalmazhatóak az automatikus repülésszabályozó, többek között a magasságstabilizáló rendszerekben is, ha sikerül az elengedhetetlenül szükséges hangolást elvégezni.

x. SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Korn, G. A. *Random-Process Simulation and Measurements*, McGraw-Hill Book Company, New York-Toronto-London-Sydney, 1966.
- [2] Csáki, F. *Szabályozások dinamikája – lineáris rendszerek*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974.

- [3] Асланян, А. Э.: *Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов*, Часть I, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, Киев, 1984.
- [4] Красовский, А. А. – Вавилов, Ю. А. – Сучков, А. И.: *Системы автоматического управления летательных аппаратов*, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, Москва, 1986.
- [5] Dr. Rohács, J. – Simon, I. *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
- [6] McLean, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall, Int., New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore, 1990.
- [7] Shahian, B. — Hassul, M. *Control System Design Using MATLAB®*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [8] *Control System Toolbox 5.1 for Use with MATLAB®* (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [9] MATLAB® 6.5 – *The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2002.
- [10] *MIL-STD-1797A, Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft*, Department of Defense Interface Standard, 2004.
- [11] Pokorádi, L. *Introduction to Mathematical Diagnostics – I. Theoretical Backgrounds*, Technical Bulletins of Debrecen, HU ISSN 1587 9801, Vol. 2007/1., p(65-80).
- [12] Szabolcsi, R. *Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek*, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, egyetemi tankönyv, 2011.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

IV. FEJEZET

UAV IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATA

I. RÉSZ

SZTOCHASZTIKUS SZABÁLYOZÁSI RENDSZEREK SZÁMÍTÓGÉPES VIZSGÁLATA



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. BEVEZETÉS

A fizikai rendszerek, többek között a szabályozási rendszerek is valós környezetben működnek, ahol a rendszerek működését rendszerint külső-, és belső zavarások, zajok gerjesztik. A szabályozási rendszerek tervezése során azonban azokat gyakran determinisztikus rendszernek feltételezik. Magától értetődik, hogy az így tervezett rendszer a valós fizikai környezetben is működőképes kell, hogy maradjon. A szerző célja egy felnyitott-, és egy zárt szabályozási rendszer példáján keresztül bemutatni, hogy milyen jellegű vizsgálatokat célszerű elvégezni a sztochasztikus rendszerek vizsgálata során. Az alaptag-, és a zárt szabályozási rendszer vizsgálatához a szerző erre a célra általa készített MATLAB[®]-forráskódokat használ. Az irányítástechnikában sokszor találkozunk olyan folyamatokkal, amelyek szabálytalan, azaz *véletlen* lefolyásúak. A sztochasztikus elnevezést az ilyen jellegű, időben lejátszódó folyamatok matematikai leírására alkalmazzuk. A sztochasztikus elnevezést általában olyan időben lejátszódó folyamatokra használják, amelyek teljesen véletlenszerű lefolyásúak. Ismeretes, hogy a sztochasztikus folyamat olyan statisztikus folyamat, amelynek mintavételi tere a t idő, a valószínűségi változója pedig az $x(t)$ függvény. A matematikai és a műszaki irodalomban gyakran használatos még a *valószínűségi folyamat*, vagy a *véletlen folyamat* elnevezés is.

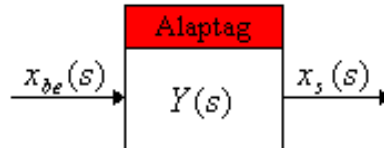
II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A sztochasztikus folyamatok matematikai leírásával, az alapvető összefüggések megadásával, illetve azok magyarázatával az [1, 2, 3, 4, 13] irodalmak foglalkoznak részletesen. E szakkönyvek részletesen taglalják a sztochasztika alapösszefüggéseit, megadják a valószínűségszámítás alapegyenleteit. Definiálják az eloszlás-függvényt, valószínűség-sűrűségfüggvényeket, a középértékeket, a szórást, a varianciát, valamint más, fontos statisztikai mennyiségeket. Eme sztochasztikus függvényeket és mennyiségeket úgy diszkrét, mint folytonos mintavételi téren definiálják.

A fejezetben idézett irodalmak második csoportja azon források köre, amelyek alapvetően a sztochasztikus rendszerek analízisével, és szintézisével foglalkoznak. Az [5] irodalom a sztochasztikus zavarások által gerjesztett szabályozási rendszerek LQG-robosztus szabályozóinak tervezésével foglalkozik. Fontos gyakorlati példája az X-29 kísérleti repülőgép szabályozója tervezésének bemutatása. A [7] irodalom a szabályozási rendszerek szintézisével, és analízisével is foglalkozik. A könyv számos MATLAB[®]-forráskódot is tartalmaz, így a programozásban kevésbé járatosak is eredményesen lapozhatják. A [8, 9, 10] irodalmak gyakorlati szempontból kutatják, és mutatják be a sztochasztikus rendszerek vizsgálatának, és előzetes tervezésének lépéseit. A fejezetben elsőként közölt gyakorlati feladatok kiindulási adatokat a [6, 7] irodalmak szolgáltatták.

III. ALAPTAGOK VIZSGÁLATA SZTOCHASZTIKUS BEMENŐJEL ESETÉN

Szabályozástechnikában nagy jelentőséggel bírnak az arányos–kétárolós, lengő tagok, amelyeket sokszor – a megfelelő hangolás után – szűrő kapcsolásként is alkalmaznak [2, 5, 7]. Vizsgáljuk meg két automatikai alaptag viselkedését, ha azok bemenetét sztochasztikus jel gerjeszti! A vizsgált alaptagok hatásvázlata a 3.1. ábrán látható.

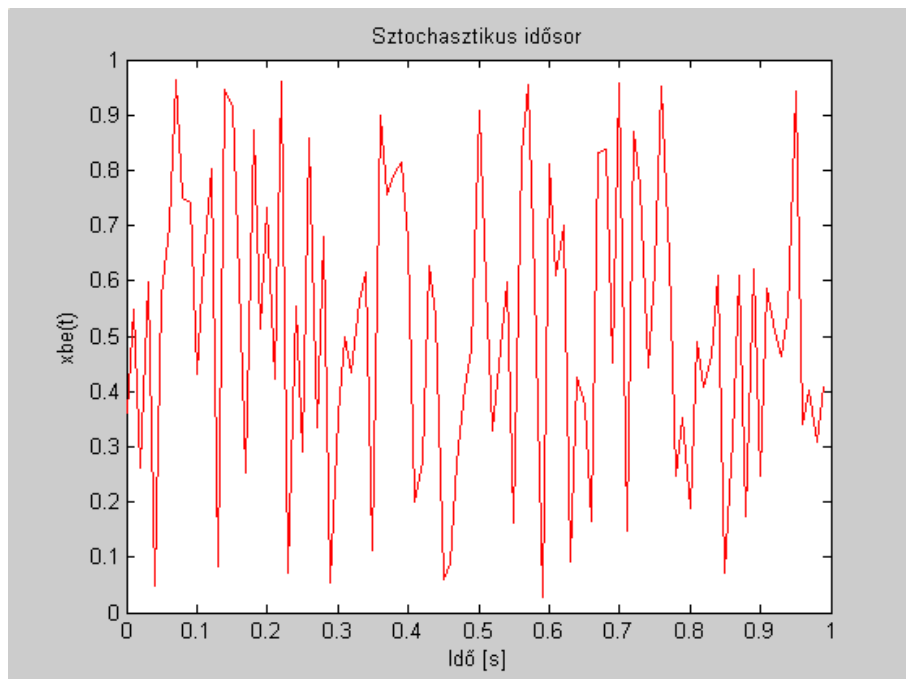


3.1. ábra. Alaptag vizsgálatának hatásvázlata.

A két tag átviteli függvénye legyen azonos jellegű, de térjenek el az átviteli sáv szélességükben. A továbbiakban legyen a két alaptag átviteli függvénye a következő [7]:

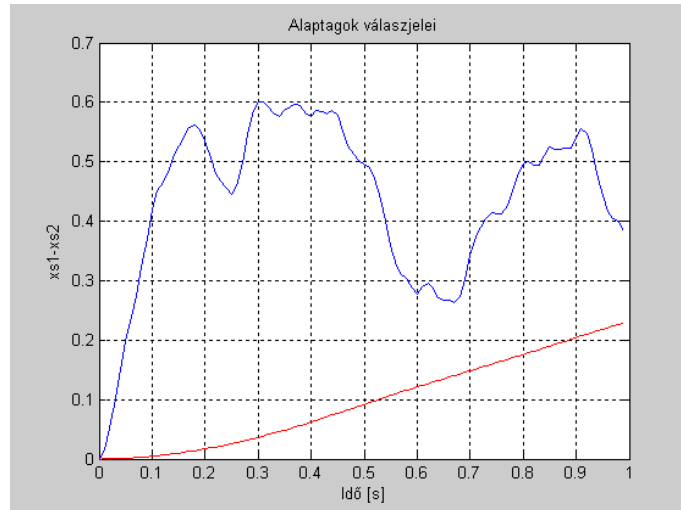
$$Y_1(s) = \frac{2}{s^2 + 2s + 2}; Y_2(s) = \frac{625}{s^2 + 25\sqrt{2}s + 625} \quad (3.1)$$

Hozzunk létre sztochasztikus idősort. E feladat megoldását a MATLAB® programcsomag *rand.m* segédfüggvénye támogatja. A sztochasztikus idősor egy realizációja a 3.2. ábrán látható.



3.2. ábra. Az $x_{be}(t)$ sztochasztikus idősor.

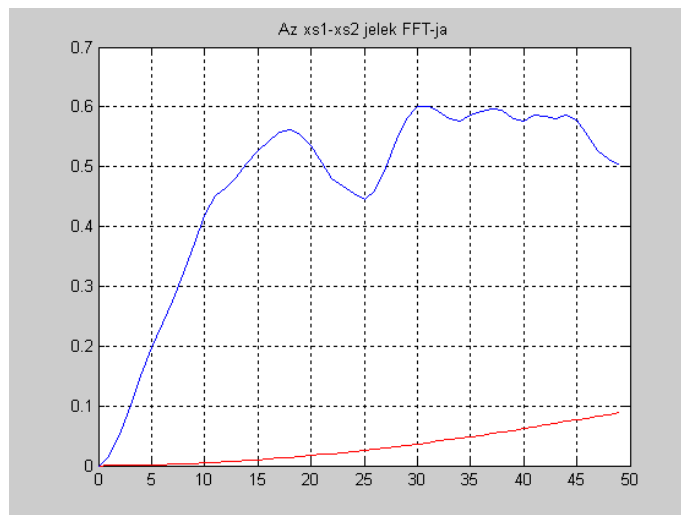
Kapcsoljuk eme függvényt előbb az $Y_1(s)$, majd az $Y_2(s)$ átviteli függvényű tagok bemenetére, és vizsgáljuk meg az egyes tagok válaszát! A számítógépes analízis összehasonlító eredménye a 3.3. ábrán látható. A 3.3. ábra alapján könnyen belátható, hogy az $Y_1(s)$ átviteli függvényű tag a tranzien folyamat kezdetén csak lassan reagál a bemeneti jel változásaira. Az $Y_2(s)$ átviteli függvényű tag az analízis szinte teljes ideje alatt intenzív válaszfüggvényt ad.



3.3. ábra. Alaptagok sztochasztikus bemeneti jelre adott válaszfüggvényei.

1. alaptag ($Y_1(s)$) 2. alaptag ($Y_2(s)$)

Az alaptagok vizsgálatának további lépése legyen a Fourier-transzformáció számítása, és a Fourier-alak ábrázolása. A gyors-Fourier transzformáció (FFT) számítását a MATLAB[®] programcsomag *fft.m* segédfüggvénye támogatja. A két tag Fourier-transzformáltja a 3.4. ábrán látható.

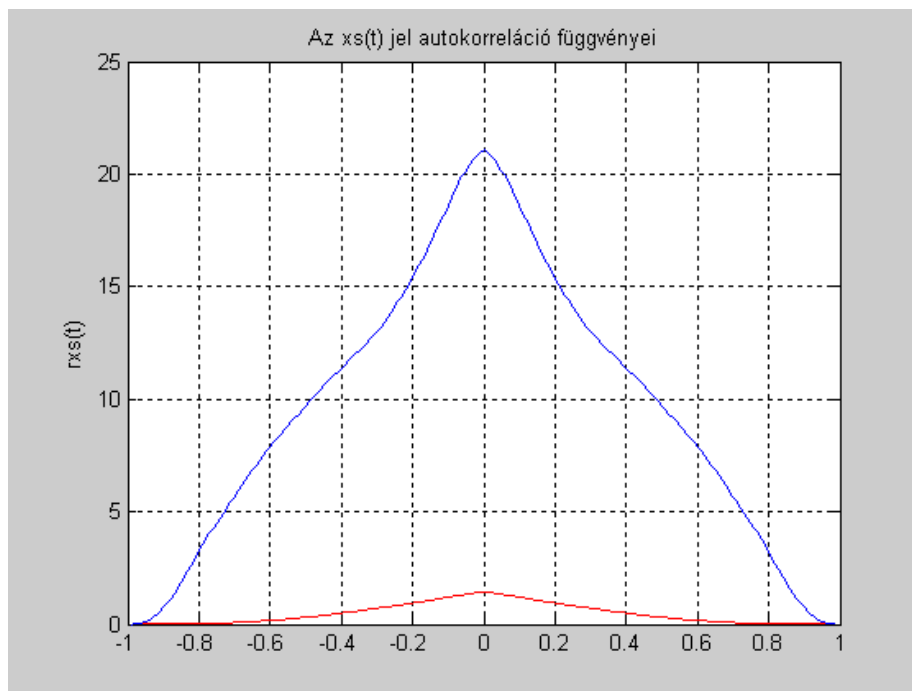


3.4. ábra. Alaptagok kimeneti jeleinek FFT-ja.

1. alaptag ($Y_1(s)$) 2. alaptag ($Y_2(s)$)

A 3.4. ábra alapján elmondható, hogy az $Y_1(s)$ átviteli függvényű alaptag kimeneti jele nem tartalmaz periodikus összetevőt, míg az $Y_2(s)$ átviteli függvényű tag $x_{s2}(t)$ kimeneti jele $f_1 \cong 17\text{Hz}$ és $f_2 \cong 42\text{Hz}$ frekvenciákon periodikus összetevővel rendelkezik, mivel ezeken a frekvenciákon az FFT-függvény maximumokkal bír.

A továbbiakban vizsgáljuk meg az alaptagok kimeneti jeleinek korreláció-függvényeit. Először határozzuk meg az auto-korreláció függvényt, amely megadja, hogy egy idősor következő mintavételezési ponton vett függvényértéke hogyan függ ugyanazon időszornak az előző mintavételezési pontban mért függvényértékétől. Az analízis eredménye a 3.5. ábrán látható.



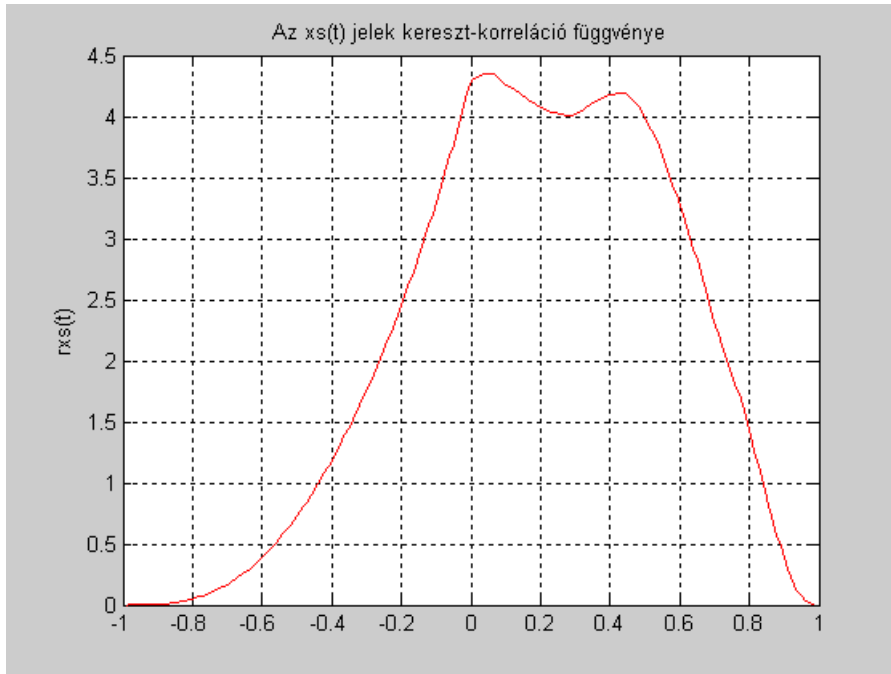
3.5. ábra. Az $x_s(t)$ jelek auto-korreláció függvényei.

1. alaptag ($x_{s1}(t)$) 2. alaptag ($x_{s2}(t)$)

Mint az a 3.5. ábrán is jól látható, az $Y_2(s)$ átviteli függvényű tag kimeneti jelének auto-korreláció függvénye nagyobb értékű, mint az 1. tagé, így tehát a 2. alaptag $x_{s2}(t)$ kimeneti jele értékei között szorosabb a kapcsolat, jobban korrelálnak, mint az 1. alaptag esetén.

Érdekes vizsgálati eredményt sejtet a két alaptag kimeneti jele kereszt-korreláció függvényének vizsgálata. A kereszt-korreláció azt adja meg, hogy két idősor, a mi esetünkben az alaptagok $x_{s1}(t)$ és $x_{s2}(t)$ válaszjelei, egy adott mintavételezési időpillanatban milyen kapcsolatban állnak egymással?! A számítógépes analízis eredménye a 3.6. ábrán látható. A 3.6. ábra alapján könnyen belátható, hogy a kapcsolat a zérusértékű eltoláson a legerősebb. A pozitív előjelű eltolások esetén erősebb a két jel közötti kapcsolat, mint a negatív előjelű eltolások esetén.

A gyakorlatban úgy az auto-, mint a kereszt-korreláció függvényt szokás normálni, amikor is a függvények maximális értéke egységnyi lehet [1, 2, 7, 8].

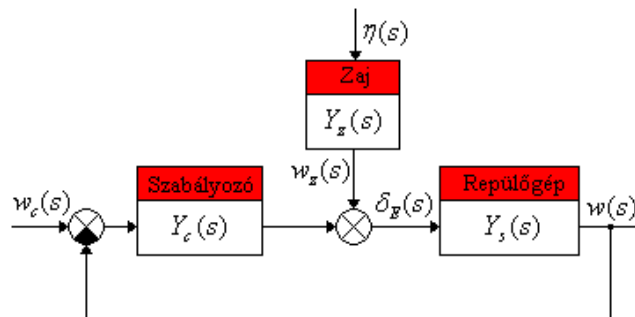


3.6. ábra. Az $x_{s_1}(t)$ és a $x_{s_2}(t)$ jelek kereszt-korreláció függvénye.

A sztochasztikus rendszerek teljes körű és teljes mélységű analizését az [1, 2, 3, 5, 7, 13] irodalmak taglalják, eme források segítségével a téma iránt érdeklődők mélyebb ismeretekre is szert tehetnek.

IV. ZÁRT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER ANALÍZISE SZTOCHASZTIKUS BEMENETI JELRE

A sztochasztikus analízis másik érdekes területe a zárt szabályozási rendszerek analízise sztochasztikus zavarások esetén. Vizsgálatainkat végezzük el egy hipotetikus légi jármű (UAV) feltételezett csillapító automatájának vizsgálatára, amelynek hatásvázlata a 4.1. ábrán látható [6].



4.1. ábra. Repülőgép csillapító automatájának hatásvázlata.

A 4.1. ábrán található jelek az alábbiak: $w_c(s)$ a függőleges repülési sebesség kívánt értéke; $w(s)$ a függőleges repülési sebesség pillanatnyi értéke; $\eta(s)$ fehér zaj; $w_z(s)$ zavaró jellemző; $\delta_E(s)$ a magassági kormány szögkitérése.

A 4.1. ábrán található átviteli függvények a következő alakban adhatók meg:

1) Szabályozó. A szabályozó átviteli függvényét először P-típusú (Y_{c1}), majd PI-típusúnak (Y_{c2}) tekintjük, ahol [7]:

$$Y_{c1}(s) = 5; Y_{c2}(s) = 5 + \frac{1}{s} \quad (4.1)$$

2) Repülőgép dinamika. A repülőgép földközeli magasságon, $U_o = 136 \text{ m/s}$ sebességgel repül. A repülőgép hosszirányú mozgásának identifikált modelljét [6] alapján az alábbi alakban írhatjuk fel:

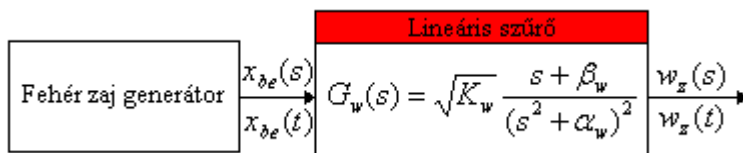
$$Y_s(s) = \frac{w(s)}{-\delta_E(s)} = 95,166 \frac{s^3 + 85,426s^2 + 1,9717s + 80,86}{s^4 + 2,92s^3 + 2,178s^2 + 0,015s + 0,01} \quad (4.2)$$

3) A lineáris szűrő. Az átviteli függvény a következő egyenlet alapján határozható meg [6]:

$$Y_z(s) = \sqrt{K_w} \frac{s + \beta_w}{(s + \alpha_w)^2} \quad (4.3)$$

4.1. A SZTOCHASZTIKUS ZAJ MATEMATIKAI LEÍRÁSA

Vizsgálataink során feltételezzük, hogy repülőgép térbeli mozgását a légköri turbulencia gerjeszti. A sztochasztikus zavaró jel előállítását a 4.2. ábrán megadott rendszerben történik.



4.2. ábra. Sztochasztikus idősor előállítása lineáris szűrő segítségével.

A fehér zaj generátor állítja elő a fehér zajt, amely – azonos értékű sűrűség-függvények mellett – magába foglalja az összes lehetséges frekvenciájú harmonikus jelet. A generátor kimeneti jele a lineáris szűrő bemenetére kerül, amely szűri a fehér zajt, és előállítja a légköri turbulencia függőleges sebességi összetevőjének sztochasztikus idősorát. A légköri turbulencia matematikai modelljének létrehozó lineáris szűrő paramétereit (4.2. ábra) a következő összefüggések írják le [6]:

$$K_w = 3 \frac{\sigma_w^2}{\pi L_w U_o}; \beta_w = \frac{U_o}{\sqrt{3} L_w}; \alpha_w = \frac{U_o}{L_w} \quad (4.4)$$

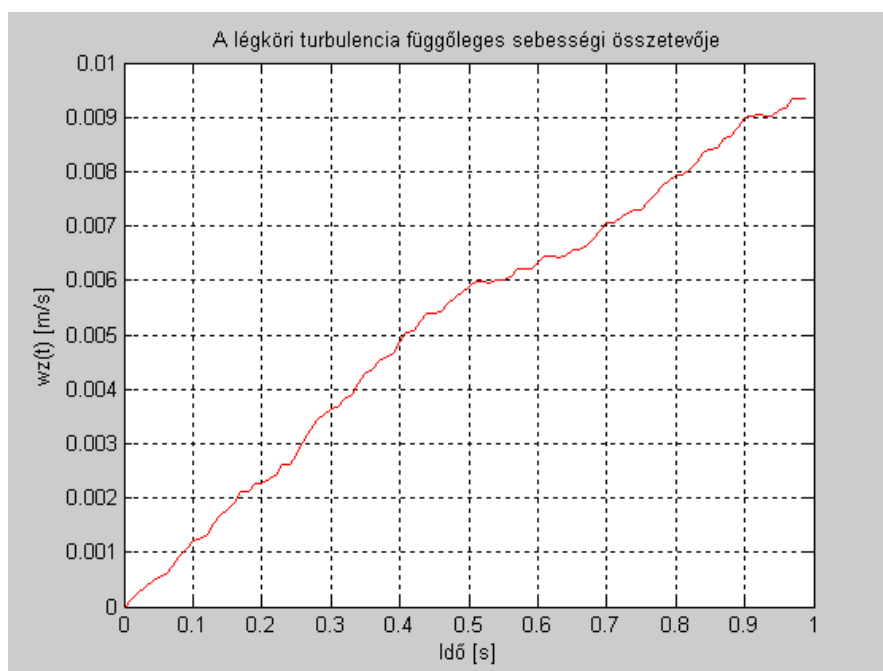
Feltételezzük továbbá, hogy a földközeli repülés során közepes erősségű zivatart kísérő turbulenciába kerül a repülőgép. Ily módon a (4.4) egyenletben szereplő és a turbulencia függőleges összetevőjére jellemző paraméterek az alábbiak lesznek [6]:

$$L_w = 580 \text{ m}; \beta_w = 7 \text{ m/s}; U_o = 136 \text{ m/s} \quad (4.5)$$

ahol: L_w [m] (integrál) léptéktényező; β_w [m/s] – szórás; U_o [m/s] – repülési sebesség. Helyettesítsük be a (4.5) egyenletben megadott paramétereket a (4.4) egyenletbe!

$$K_w \cong 5,932 \cdot 10^{-4}; \beta_w \cong 0,1354; \alpha_w \cong 0,2345 \quad (4.6)$$

A lineáris szűrő által létrehozott $w_z(t)$ sztochasztikus idősor a 4.3. ábrán látható.

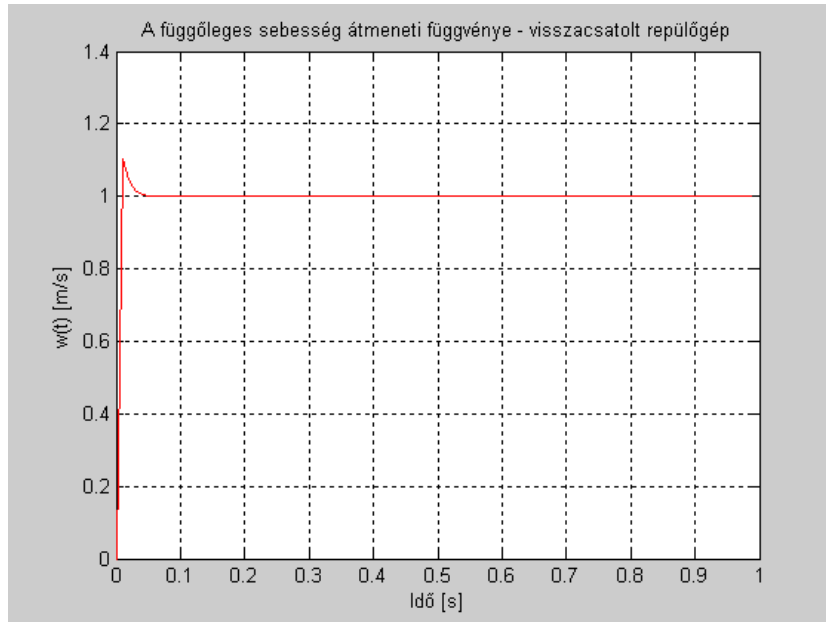


4.3. ábra. A lineáris szűrő kimeneti jele.

Vizsgálataink során e jelet kapcsoljuk a repülőgép formális bemenetére, és vizsgáljuk a zárt szabályozási rendszer válaszát.

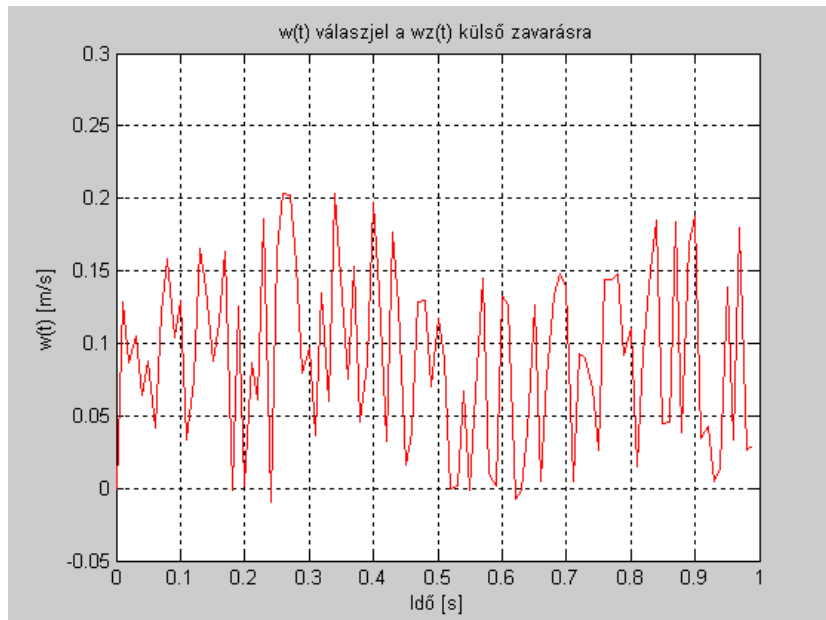
4.2. A P-SZABÁLYOZÓVAL MŰKÖDŐ ZÁRT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER (CSILLAPÍTÓ AUTOMATA) STATISZTIKUS ANALÍZISE

Vizsgálataink kezdeti fázisában legyen a soros kompenzátor átviteli függvénye Y_{c1} . Először vizsgáljuk meg a zárt szabályozási rendszer átmeneti függvényét! A számítógépes analízis eredménye a 4.4. ábrán látható.



4.4. ábra. A zárt szabályozási rendszer átmeneti függvénye P-szabályozó esetén.

A 4.4. ábrán jól látható, hogy a tranzien folyamat gyorsan lecseng: egy előjelváltó lengéssel, nagyon rövid idő alatt áll be az egységnyi bemeneti jel. Vizsgáljuk a következő lépésben azt az esetet, amikor a szabályozási rendszer bemeneti jele zérusértékű, viszont külső zavarás gerjeszti a szabályozási rendszert. A számítógépes analízis eredménye a 4.5. ábrán látható.



4.5. ábra. Repülési sebesség függőleges összetevőjének időszora.

Tekintettel arra, hogy a repülőgép válaszjeleit – a szuperpozíció elve alapján – össze is adhatjuk, így a repülési sebesség függőleges összetevőjének valós repülési közegben mért időfüggvénye a következő lesz (4.6. ábra):

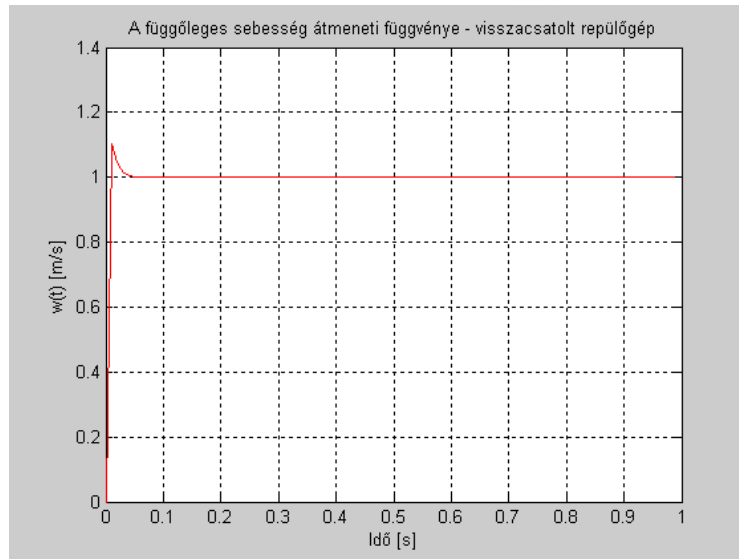


4.6. ábra. A repülőgép átmeneti függvénye additív zajjal.
Ideális eset **Külső zavarás esete**

A 4.6. ábrán jól látható, hogy az ideális, zavarásmentes esetben, nagyon rövid tranzienst követően beáll a stabilis állapot. Ha külső zaj gerjeszti a rendszert, akkor a külső zavaró jelre adott rendszerválasz additív módon hozzáadódik az alapjelre adott átmeneti függvényhez. Külső zaj, a mi esetünkben a légköri turbulencia függőleges összetevője esetén a zárt szabályozási rendszer válaszele – egyszerű P-típusú szabályozó esetén – az állandósult érték körül véletlenszerűen leng. Elmondhatjuk továbbá, hogy a proporcionális (P) szabályozó nem képes szűrni a külső zavarás által létesített lengéseket.

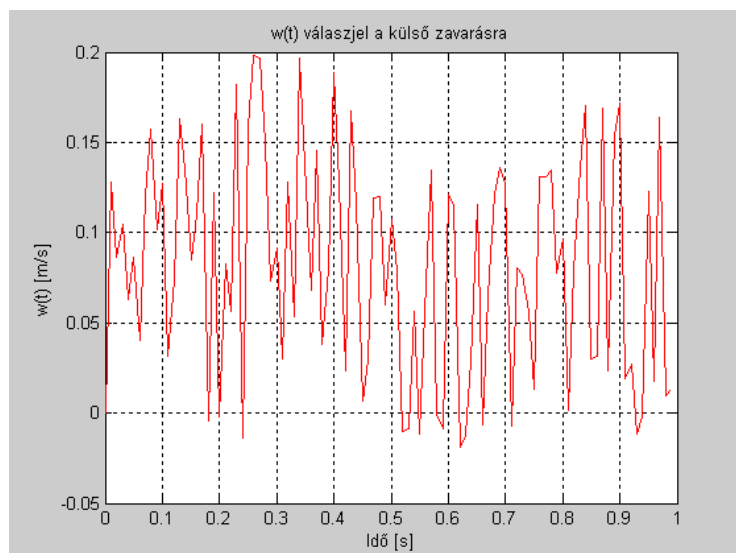
4.2. A PI-SZABÁLYOZÓVAL MŰKÖDŐ ZÁRT SZABÁLYOZÁSI RENDSZER (CSILLAPÍTÓ AUTOMATA) STATISZTIKUS ANALÍZISE

Hasonlóképpen, mint ahogyan azt tettük az előző fejezetben, vizsgáljuk meg a csillapító automata viselkedését, ha a szabályozója ún. arányos–integráló (PI)–típusú, vagyis a szabályozó átviteli függvénye most Y_{c2} . A számítógépes analízis eredménye a 4.7. ábrán látható.



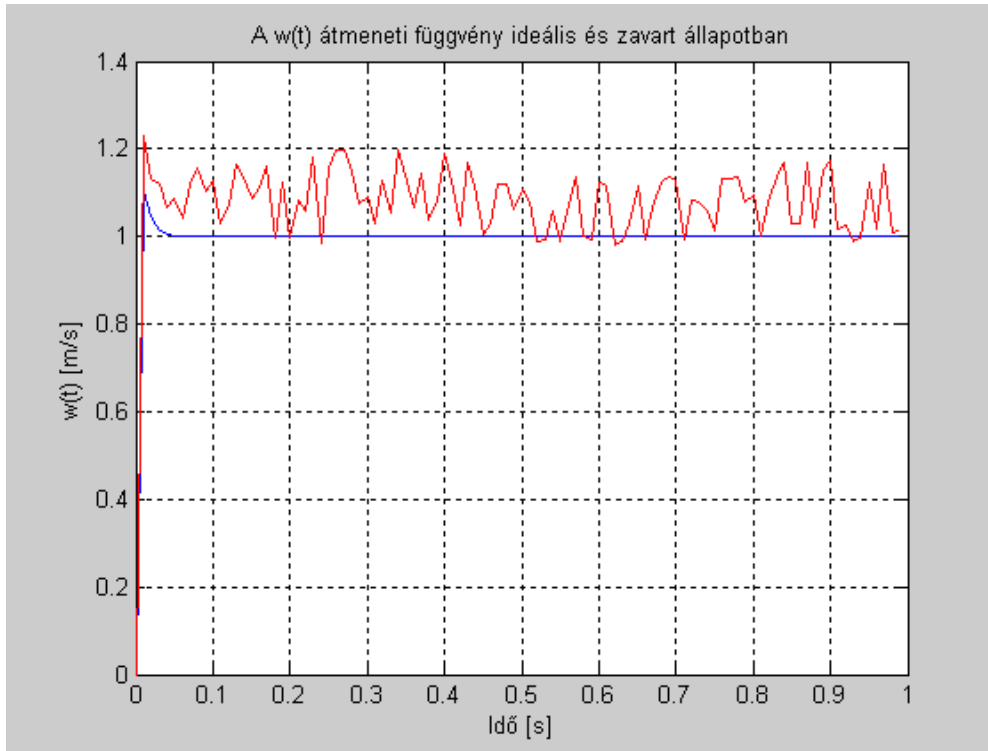
4.7. ábra. A repülőgép átmeneti függvénye PI-szabályozó esetén.

A 4.7. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a repülési magasság egy túllendüléssel, kellően gyorsan beáll annak kívánt értékére. A zárt szabályozási rendszer eleget tesz alapvető feladatának: megfelelő pontossággal képes követni az alapjel egyes időfüggvényeit. Most vizsgáljuk meg, hogy hogyan viselkedik a zárt szabályozási rendszer, ha csak a külső zavarás hat rá. A számítógépes szimuláció eredménye most a 4.8. ábrán látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a PI-szabályozó sem képes maradéktalanul elhárítani a külső zavarás zárt szabályozási rendszerre gyakorolt hatását: a zérusértékű alapjel ellenére a rendszerben kimeneti jel mérhető, ami nemkívánatos jelenség. Azt is mondhatjuk, hogy a csillapító automata nem képes csillapítani minden külső zavarás következményét.



4.8. ábra. A függőleges repülési sebesség idősora.

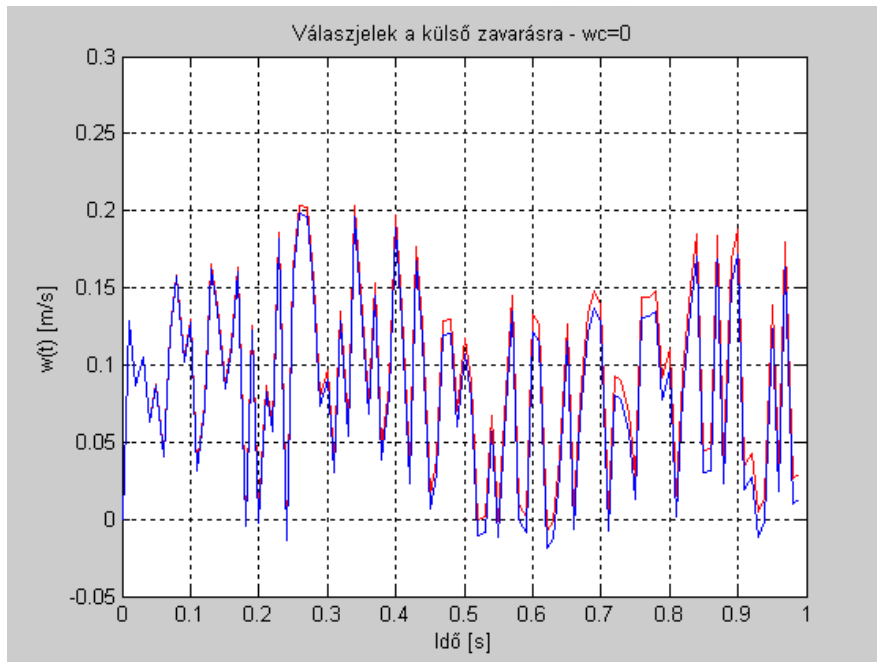
Határozzuk meg a zárt szabályozási rendszer kimeneti jelét, ha valós környezetben a rendszer működését külső zavarás, a légköri turbulencia függőleges sebességi összetevője is gerjeszti. A számítógépes szimuláció eredménye a 4.9. ábrán látható.



4.9. ábra. A repülőgép átmeneti függvénye additív zajjal.
Ideális eset **Külső zavarás esete**

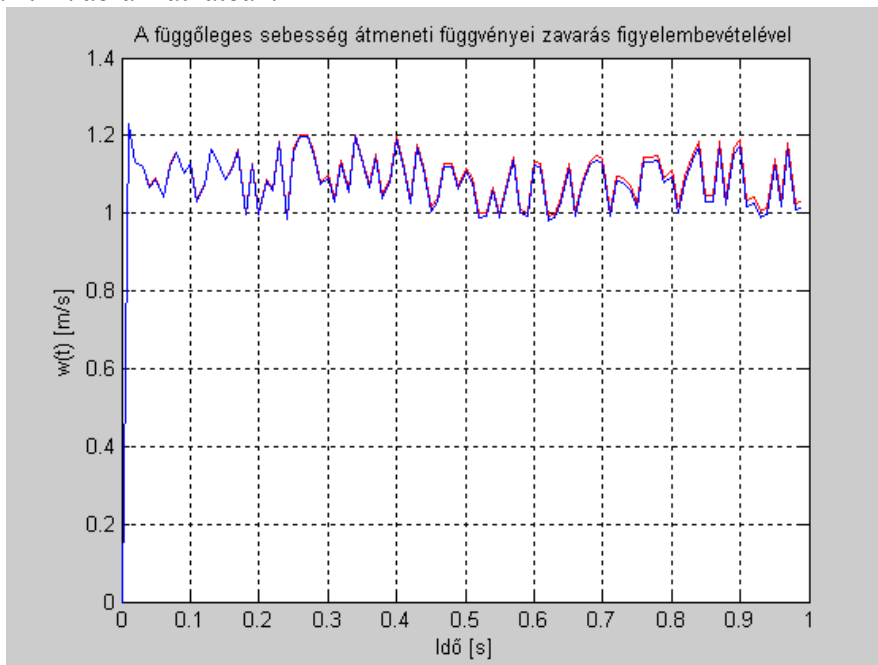
A 4.9. ábrán jól látható, hogy a PI-struktúrájú szabályozó alkalmazása esetén a csillapító automata nem szűri ki kellő hatékonysággal a zajokat, így azok a zárt szabályozási rendszer kimenetén is megjelennek.

Vizsgálataink további részében hasonlítsuk össze a P-, illetve a PI-szabályozóval működő szabályozási rendszerek tranziens viselkedését. A 4.10. ábrán a zárt szabályozási rendszer válaszjeleit láthatjuk abban az esetben, amikor a referencia jel zérusértékű, viszont a rendszert külső zaj gerjeszti. Az ábrán jól látható, hogy a PI-szabályozó ugyan kismértékben csökkenti a rendszer lengéseit, szűri a zavarást, de teljes egészében nem szünteti meg azt.



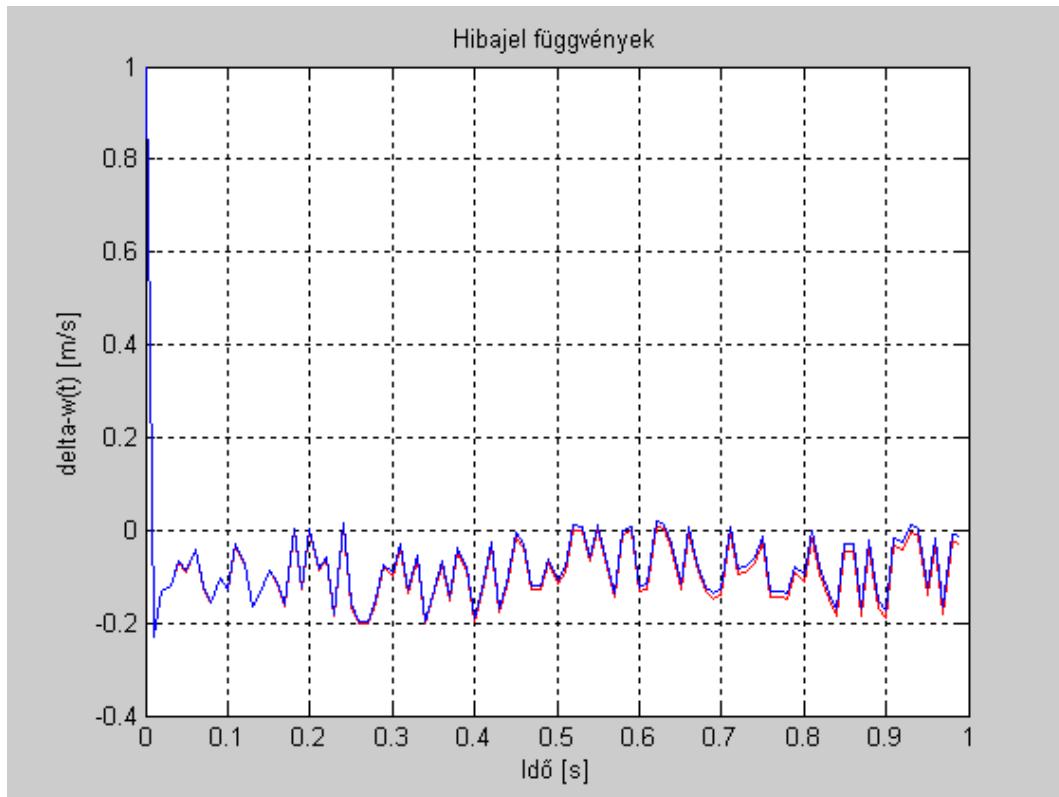
4.10. ábra. Rendszerválasz külső zavarásra.
P-szabályozó **PI-szabályozó**

Hasonló megállapításokat tehetünk a zárt szabályozási rendszerek átmeneti függvényeiről is, amelyek a 4.11. ábrán láthatóak.



4.11. ábra. Zajjal terhelt átmeneti függvények.
P-szabályozó **PI-szabályozó**

Végezetül, vizsgáljuk meg az alapjel–követés során kialakuló hibát. A hibajel időfüggvénye a 4.12. ábrán látható.



4.12. ábra. Zajjal terhelt átmeneti függvények.
P-szabályozó **PI-szabályozó**

A 4.12. ábrán jól látható, hogy a PI-szabályozó csökkentti ugyan az alapjel követési folyamat hibáját, de a hibajel $\approx -0,1$ m/s érték körül véletlenszerűen leng. Nyilvánvaló, hogy a csillapító automata csak akkor képes ellátni feladatát, ha megfelelően megtervezett szabályozóval alkalmazzák.

V. BEFEJEZÉS

E fejezetben a szerző alaptagok, illetve zárt szabályozási rendszerek sztochasztikus analízisével foglalkozott. Megállapította, hogy a valós fizikai rendszerek úgy belső, mint külső zajokkal gerjesztik a szabályozási rendszereket. Sokszor eme eltérések nem megengedettek, ezért mindenképpen szükséges a szabályozó megfelelő méretezése, amely ily módon biztosítja a megfelelő zavarvédelemet. A számítógépes analízis lefolytatásához a szerző új MATLAB[®]-forráskódokat készített, és alkalmazott.

Nem szabad azonban szem elől téveszteni, hogy a zárt szabályozási rendszer visszacsatoló ágában, bár annak egységnyi erősítése miatt azt nem jelöltük, a függőleges ebesség mérőműszerének átviteli függvénye található. A gyakorlat alkalmazott mérőműszerek, illetve

mérő-átalakító rendszerek érzéketlenségi sávja, holtideje, időkésése, valamint mérési módszere miatt e kis értékű repülési paraméterek nem jelennek meg villamos feszültség formájában a mérő-átalakító berendezés kimenetén. Ily módon a hagyományos tervezésű és hagyományos építésű repülésszabályozó rendszerekben az ilyen kis mértékű statikus hiba nem okoz gondot az alapjel követése, illetve állandó értéken tartása során.

VI. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Korn, G. A. *Random Process Simulation and Measurements*, McGraw-Hill Book Company, New York-Toronto-London-Sidney, 1966.
- [2] Csáki, F. *Szabályozások dinamikája*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974.
- [3] Csáki, F. *Irányítástechnikai kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó, 1975.
- [4] Korn, G. A. – Korn, T. M. *Matematikai kézikönyv műszakiaknak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [5] Maciejowski, J. M. *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [6] McLean, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall Int., New York-London-Toronto-Sydney-Tokyo-Singapore, 1990.
- [7] Shahian, B. — Hassul, M. *Control System Design Using MATLAB®*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [8] Szabolcsi, R. *Computer-Aided Simulation of Random Signals and Random Systems*, Bulletines for Applied & Computing Mathematics, BAM-1693/'99, pp(71-84), 1999.
- [9] Pokorádi, L. – Szabolcsi, R. *Mathematical Models Applied to Investigate Aircraft Systems*, MB-12 Monographical Booklets in Applied & Computing Mathematics, Technical University of Budapest, Budapest, 1999.
- [10] Szabolcsi, R. *Robust Controller Synthesis for the Aircraft Pitch Attitude Control System*, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2000/1., (79-89) o.
- [11] *Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB®* (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [12] MATLAB® 6.5 – *The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2002.
- [13] Szabolcsi, R. *Modern szabályozástechnika*, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

II. RÉSZ

AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZEREK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

BEVEZETÉS

A szabályozási rendszerek irányítási folyamatait – függetlenül azok jellegétől – az állandóan változó külső környezet, a szabályozási rendszer „öregedése”, a rendszer paramétereinek folyamatos eltérése a kívánt értékektől, valamint egyéb más jellegű (pl. elhanyagolt rendszerdinamikai jellemzők) hatások is befolyásolják. A nyitott hatásláncú vezérlő rendszerekben e hatások a kimeneten közvetlenül is megjelennek – a vezérlés kimeneti jele így nem felel meg az előírt értéknek. A zárt hatásláncú szabályozási rendszer azonban képes érzékelni a külső, és a belső zavarások okozta eltéréseket a bemenet jel referencia értékétől, és igyekszik csökkenteni a nemkívánatos eltérést. E probléma kezelésére a szabályozási rendszerek *érzékenységvizsgálata* jelent megoldást.

A szerző e fejezetben az UAV automatikus repülésszabályozó rendszerek érzékenységvizsgálatával foglalkozik. Bemutatja, hogy az érzékenységvizsgálat hogyan segíti a szabályozótervezés folyamatát, és hogyan támogatja a zavarvédetség javításának folyamatát. A szerző új példán keresztül mutatja be eme fontos elmélet gyakorlati alkalmazásának lépéseit.

Kulcsszavak: UAS, automatikus repülésszabályozó rendszer, érzékenységvizsgálat, stabilitásvizsgálat.

I. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Szabályozási rendszerek érzékenységének vizsgálatával DORF és BISHOP foglalkoztak, akik megadták a szabályozási rendszerek érzékenységgüggvényének matematikai leírását [1]. SZABOLCSI cikkében példákon keresztül mutatta be a zárt szabályozási rendszerek analízisének és szintézisének fontosabb lépéseit, és foglalkozott a zárt szabályozási rendszerek érzékenységének vizsgálatával is, amelyet a szabályozó előzetes tervezéséhez használt fel. Az automatikus repülésszabályozó rendszerek előzetes, LQ-alapú tervezésével SZEGEDI foglalkozott. Érdekes szabályozástechnikai területet képvisel a távirányítású légi robotok irányítása. SZABOLCSI részletesen foglalkozott a kezelőszemélyzet tevékenységének matematikai modellezésével [6, 7, 9, 10], mint a repülőgép-vezető repülésbiztonság szempontjából kritikus paramétereinek meghatározásával [4, 5]. POKORÁDI könyvében komplex módszertant ad meg, hogyan lehet az érzékenységvizsgálat segítségével egy repülőfedélzeti műszaki rendszer részegységének, vagy alkatrészének a meghibásodását, elhasználódását, valamint a környezeti hatások rendszerre gyakorolt hatását vizsgálni [8]. A szerző a számítógépes szimulációk elvégzéséhez a MATLAB programot [11], és a Control System Toolbox [12] segédprogramot alkalmazta.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL

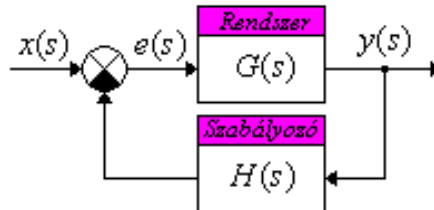


A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

II. SZABÁLYOZÁSI RENDSZEREK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA – ELMÉLETI MEGFONTOLÁSOK

A szabályozási rendszerek érzékenységvizsgálata számos olyan kérdésre ad választ, amely a szabályozási rendszerek tervezésekor, és azok vizsgálatakor óhatatlanul felmerül. Az általános felépítésű, egyszerű alakra hozott, zárt szabályozási rendszer hatásvázlatát az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. A zárt szabályozási rendszer hatásvázlata.

Az 1. ábrán: $G(s)$ a szabályozott szakasz átviteli függvénye; $H(s)$ a visszacsatoló ág eredő átviteli függvénye; $x(s)$ a bemeneti jel operátoros alakja; $y(s)$ a kimeneti jel operátoros alakja; $e(s)$ a hibajel operátoros alakja. Az 1. ábra alapján írjuk fel előbb a zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott, majd a hibajelre vonatkoztatott eredő átviteli függvényeit [1]:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}. \quad (2.1)$$

$$W_e(s) = \frac{e(s)}{x(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}. \quad (2.2)$$

A (2.1) egyenlet alapján elmondható: akkor valósul meg a lehető legpontosabban az alapjel követése, ha

$$G(s)H(s) \gg 1, \quad (2.3)$$

vagyis

$$y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} x(s) \cong \frac{1}{H(s)} x(s). \quad (2.4)$$

Könnyen belátható, hogy $H(s) = 1$ esetén a zárt szabályozási rendszer $y(s)$ kimeneti jele megegyezik az $x(s)$ bemeneti jellel. Nem szabad azonban szem előtt tévesztetni, hogy a (2.3) feltétel teljesítése erősíti a zárt szabályozási rendszer lengő hajlamát, de akár a stabilitás elvesztésével is járhat. Mindazonáltal, a felnyitott szabályozási kör $G(s)H(s)$ eredő átviteli függvényének növelése azt eredményezi, hogy a visszacsatolt, zárt szabályozási rendszer kevésbé lesz érzékeny a szabályozott szakasz $G(s)$ átviteli függvényének változására [1, 2]. Ha valamilyen okból (pl. öregedés, elhangolódás) megváltozik a szabályozott szakasz dinamikája, akkor a (2.1) egyenlet az alábbi alakban is felírható:

$$y(s) + \Delta y(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + (G(s) + \Delta G(s))H(s)} x(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + G(s)H(s) + \Delta G(s)H(s)} x(s). \quad (2.5)$$

A (2.4) és a (2.5) egyenletek felhasználásával az $y(s)$ kimeneti jel változása az alábbi összefüggés segítségével is meghatározható:

$$\Delta y(s) = \frac{\Delta G(s)}{1 + (G(s)H(s) + \Delta G(s)H(s))(1 + G(s)H(s))} x(s). \quad (2.6)$$

A gyakorlatban gyakran teljesül, hogy

$$G(s)H(s) \gg \Delta G(s)H(s), \quad (2.7)$$

ezért a (2.6) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\Delta y(s) = \frac{\Delta G(s)}{[1 + G(s)H(s)]^2} x(s). \quad (2.8)$$

A (2.8) átviteli függvény alapján elmondható, hogy a kimeneti jel változása – állandó $\Delta G(s)$ rendszerdinamikai változás mellett – annál kisebb, minél nagyobb a tört nevezője. A dinamikus rendszer érzékenységét az alábbiak szerint definiáljuk [1, 2]:

$$S(s) = \frac{\partial W(s) / W(s)}{\partial G(s) / G(s)} = \frac{\partial W(s) / W(s)}{\partial G(s)} \frac{G(s)}{W(s)}. \quad (2.9)$$

A (2.9) egyenlet alapján az alábbi érzékenységfüggvényeket definiálhatjuk:

– érzékenység a rendszerdinamikában bekövetkező változásokra:

$$S_G^W = \frac{\partial W(s) / W(s)}{\partial G(s) / G(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}. \quad (2.10)$$

– érzékenység a visszacsatoló ágba (érzékelő) bekövetkező változásokra:

$$S_H^W = \frac{\partial W(s) / W(s)}{\partial H(s) / H(s)} = -\frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}. \quad (2.11)$$

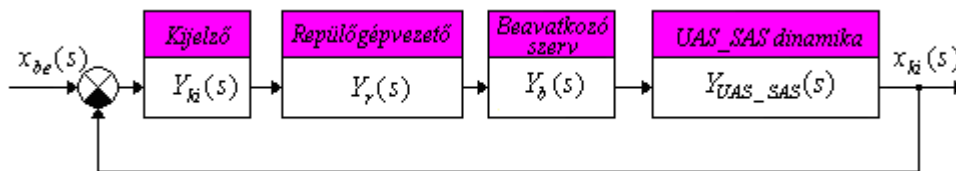
A (2.4) egyenlet alapján megállapítható, hogy a nagy értékű $G(s)H(s)$ hurokátviteli függvény esetén a rendszerdinamikában bekövetkező $\Delta G(s)$ változásra kevésbé lesz érzékeny a zárt szabályozási rendszer, míg a $\Delta H(s)$ változás közvetlenül befolyásolja a kimeneti jel értékét – ily módon tehát az érzékelő megfelelő megválasztásával törekedni kell a $H(s) = \text{const.}$ értékre ($\Delta H(s) \cong 0$).

III. KÍSÉRLETI UAS¹¹ AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERÉNEK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA

A UAS rendszerek irányítására két módszer kínálkozik. Az első az UAS rendszer kézi irányítása, amikor a kezelő (repülőgépvezető) távirányítással kormányozza a repülőgépet. E módszer alkalmazható úgy vizuális látótávolságon belül, mint azon kívül végrehajtott repülésekre is. A másik kínálkozó módszer az UAS repülésének automatizálása. Más szóval, a repülés egyes fázisaiban – előre megadott repülési pályán – a fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszer kormányozza a repülőgépet. A szerző egy hipotetikus, kísérleti repülőgép feltételezett matematikai modelljével, és feltételezett irányítási rendszerének érzékenységvizsgálatával foglalkozik.

3.1. Kísérleti UAS kézi irányításának érzékenységvizsgálata

A kísérleti UAS rendszer hatásvázlata a 2. ábrán látható.



2. ábra. Kísérleti UAS rendszer kézi irányítása.

A repülőgép vezetéséhez szükséges információkat a repülőgép-vezető részére kijelzőn jelenítik meg. A továbbiakban feltételezzük, hogy a kijelző holtidő- és időkésés nélküli, gyors információ megjelenítést tesz lehetővé, ezért annak átviteli függvényét egységnyi erősítésűnek tekintjük, vagyis

$$Y_{ki}(s) = 1. \quad (3.1)$$

A kezelő/repülőgépvezető tevékenységének matematikai modellezésével a [6, 7, 9, 10] irodalmak foglalkoznak részletesen, míg a [4, 5, 10] irodalmak a repülőgépvezetők – repülésbiztonság szempontjából – kritikus paramétereinek meghatározásával foglalkoznak. A továbbiakban feltételezzük, hogy a kezelő tevékenysége – többcsatornás irányítások esetén – holtidős, proporcionalis taggal írható le, vagyis:

$$Y_r(s) = K_p e^{-s\tau} \cong K_p \frac{1 - \tau/2 s}{1 + \tau/2 s}. \quad (3.2)$$

¹¹ Unmanned Aerial System

A (3.2) egyenletben a holtidő közelítésére elsőrendű Padé-approximációt alkalmaztunk, ahol $\tau = 0,5s$ [1, 4, 5, 6, 7]. Vizsgálataink során feltételezzük, hogy a beavatkozó szerv gyors működésű, időkésés, és holtidő nélküli, így módon annak átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_b(s) = 1. \quad (3.3)$$

Végezetül, a kísérleti, hipotetikus UAS hosszirányú rövidperiodikus dinamikája, más szóval az átviteli függvénye legyen a következő:

$$Y_{UAS}(s) = \frac{\omega_z(s)}{\delta_m(s)} = \frac{A(s + T_g)}{(s^2 + 2\xi_\alpha \omega_\alpha s + \omega_\alpha^2)}. \quad (3.4)$$

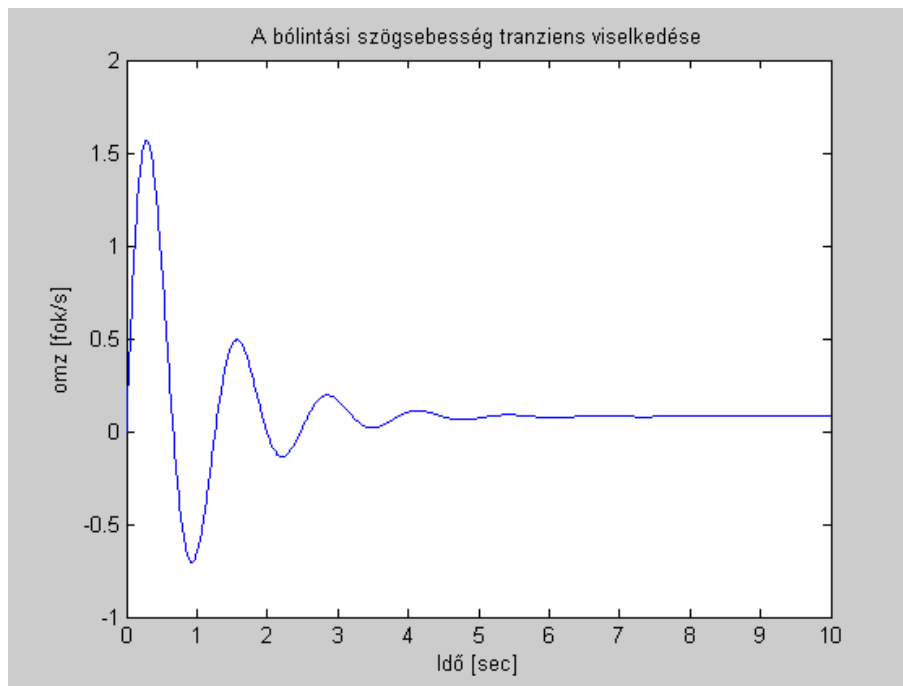
Az UAS paraméterei legyenek az alábbiak:

$$A = 10; T_g = 0,2s; \xi_\alpha = 0,2; \omega_\alpha = 5rad / s. \quad (3.5)$$

A (4.4) egyenlet – a (4.5) paraméterek figyelembevételével – az alábbi alakban is felírható:

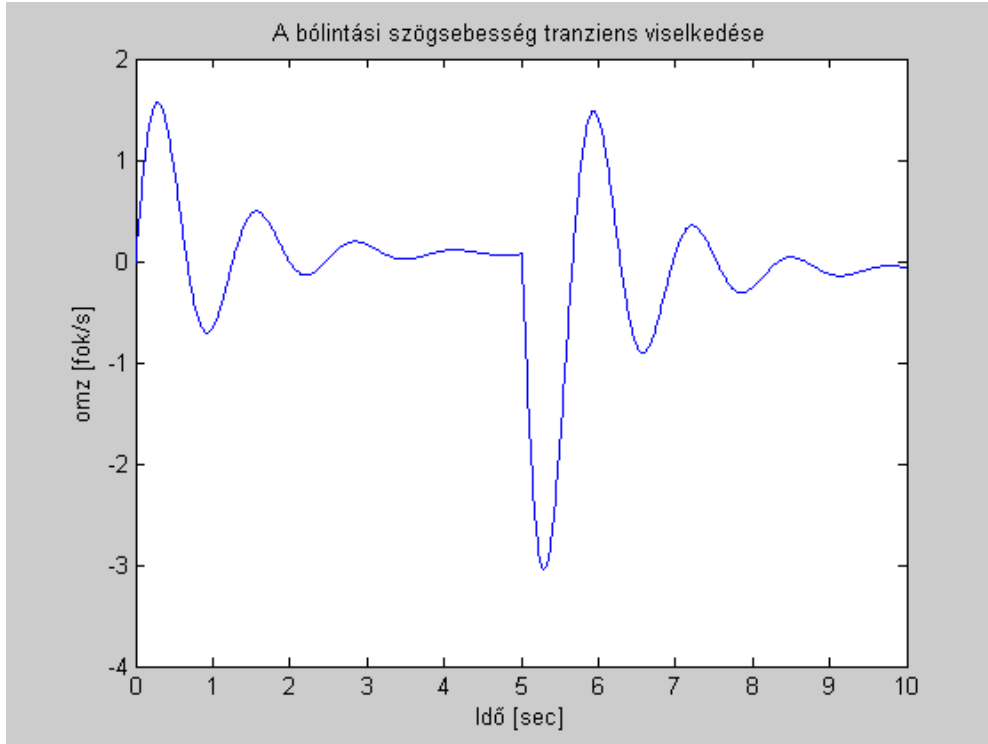
$$Y_{UAS}(s) = \frac{10s + 2}{(s^2 + 2s + 25)}. \quad (3.6)$$

A bólintási szögsebesség irányítása során a nemirányított (irányításmentes) UAS számítógépes analízisének eredményeit a 3. és a 4. ábra mutatja be.



3. ábra. A nemirányított UAS viselkedése időtartományban.

A 3. ábra alapján megállapítható, hogy a tranziens folyamat kezdetén – a kis értékű csillapítási tényező miatt – a bólintási szög nagy túllendüléssel válaszol a bemeneti $f(t)=1(t)$ vizsgálójelre.



4. ábra. A nemirányított UAS viselkedése időtartományban

A 4. ábrán az UAS négyszögjel bemeneti jelre adott válaszfüggvényét látjuk. Itt is megállapítható, hogy az UAS sajátlengéseinek csillapítása kicsi, ezért csak nagyszámú előjelváltó lengés után áll be a stacioner állapot.

A (3.5) egyenlet alapján elmondható, hogy a nemirányított UAS kis értékű csillapítási tényezővel rendelkezik, ezért – javítandó a dinamikus minőségi jellemzőket – a gyakorlatban sokszor csillapító automatát (**Stability Augmentation System – SAS**) építenek az UAS rendszerre. Feltételezzük, hogy az általunk is vizsgált UAS rendszer arányos, 0,5 értékű merev visszacsatolással rendelkezik. Ennek megfelelően, a visszacsatolt UAS rendszer átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_{UAS_SAS}(s) = \frac{\omega_z(s)}{\omega_{zc}(s)} = \frac{10s + 2}{s^2 + 7s + 26}. \quad (3.7)$$

A gyakorlatban, számos esetben szükséges a zárt szabályozási rendszerek érzékenységvizsgálatának lefolytatása. Ismeretes, hogy az UAS kézi irányítása során, a repülőgép-vezető paraméterei folyamatosan változhatnak.

Érdekes megvizsgálni, hogyan az UAS bólintási szög stabilizáló zárt szabályozási rendszere mennyire érzékeny e változásokra. A 2. ábra alapján – felhasználva a (3.1)-(3.7) összefüggéseket – az UAS zárt szabályozási rendszerének átviteli függvénye a következő lesz:

$$W(s) = \frac{g(s)}{g_c(s)} = \frac{K_p(-2,5s^2 + 9,5s + 2)}{0,25s^4 + 2,75s^3 + s^2(13,5 - 2,5K_p) + s(26 + 9,5K_p) + 2} = \frac{A(s)}{B(s)}. \quad (3.8)$$

A (3.9) egyenletet felhasználva, az UAS rendszer érzékenységi függvénye az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$S_W^{K_p}(s) = \frac{dW(s)}{dK_p} \frac{K_p}{W(s)}, \quad (3.9)$$

$$S_W^{K_p}(s) = \frac{dW(s)}{dK_p} \frac{K_p}{W(s)} = \frac{\frac{dA(s)}{dK_p} B(s) - \frac{dB(s)}{dK_p} A(s)}{(B(s))^2} K_p \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (3.10)$$

$$\frac{dA(s)}{dK_p} = -2,5s^2 + 9,5s + 2, \quad (3.11)$$

$$\frac{dB(s)}{dK_p} = -2,5s^2 + 9,5s. \quad (3.12)$$

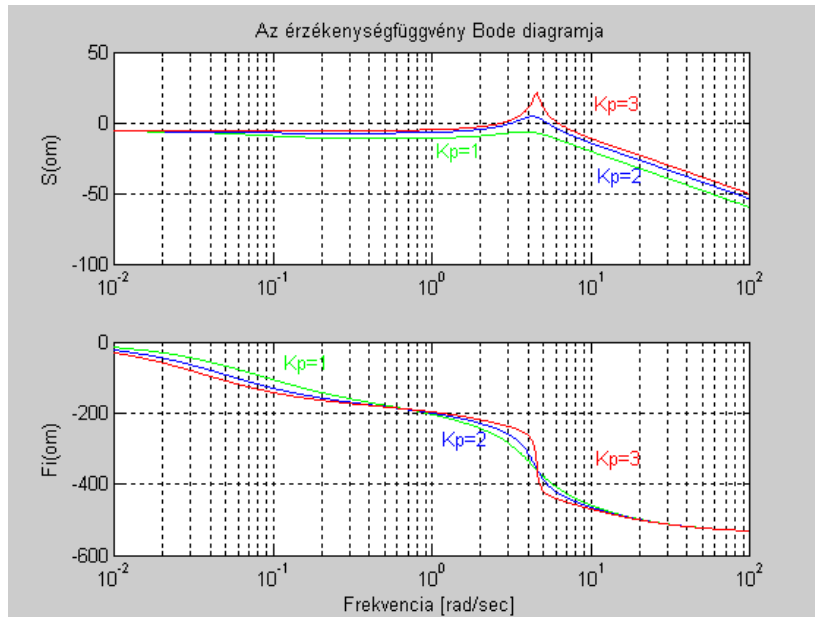
Behelyettesítve a (3.11)–(3.12) egyenleteket a (3.10) kifejezésbe az alábbi egyenletet kapjuk.

$$S_W^{K_p}(s) = \frac{2,5K_p s^2 - 9,5K_p s + 1}{0,25s^4 + 2,75s^3 + s^2(13,5 - 2,5K_p) + s(26 + 9,5K_p) + 2}. \quad (3.13)$$

A (3.13) egyenlet alapján vizsgáljuk meg a zárt szabályozási rendszer érzékenység függvényének viselkedését frekvenciatartományban a $K_{p1} = 1$, $K_{p2} = 2$, és a $K_{p3} = 3$ értékekre.

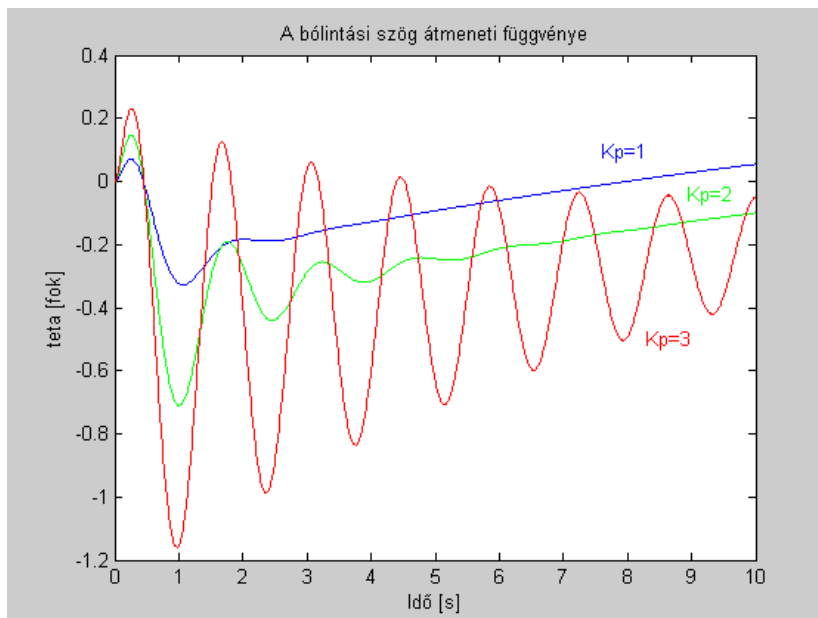
Hasonlóképpen, vizsgáljuk meg a zárt szabályozási rendszer viselkedését idő-, és frekvenciatartományban. A számítógépes analízis eredményei az 5., és a 6. ábrákon láthatóak.

Az 5. ábra alapján könnyű belátni, hogy a K_p erősítés növekedése esetén az érzékenységgüggvény erősítési tényezője folyamatosan növekszik: főleg közepes és nagyfrekvenciás tartományban számottevő a növekedés. A fázisszög ellentétes értelemben változik: kis- és közepes frekvenciatartományban érdemi a változás, míg a nagyfrekvenciás tartományban szinte nincs változás a fázisszögben.



5. ábra. Az UAS zárt szabályozási rendszer érzékenységeinek viselkedése frekvenciatartományban.

A 6. ábra alapján megállapítható, hogy a K_p erősítés növelése a zárt szabályozási rendszert az instabilitás irányába viszi el: az erősítési tényező növekedése egyértelműen a lengési hajlam lényeges növekedését mutatja.



6. ábra. Az UAS zárt szabályozási rendszer érzékenységeinek viselkedése frekvenciatartományban.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS, EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

Az UAS rendszerek egyre szélesebb körben terjednek el úgy a katonai-, mint a polgári alkalmazási területeken. Az UAS rendszerek fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszere tervezése során megkerülhetetlen az érzékenységvizsgálat.

Magától értetődik, hogy irányítási paraméterként olyan műszaki paramétert kell választani, amelyre az UAS fedélzeti rendszer a lehető legnagyobb mértékben érzékeny, másképp, egy és ugyanazon irányítási hatékonyság eléréséhez nagyon nagy energiákat kell befektetni.

A szerző a fejezetben bemutatta, hogy az UAS zárt szabályozási rendszer – kézi irányítások esetén – mennyire érzékeny a repülőgép-vezető erősítési tényezőjének megváltozására. Az erősítés növekedése az érzékenység növekedésével jár, és ez kifejezetten előnyös.

Látni kell azonban, hogy az erősítés növekedése a zárt szabályozási rendszert a stabilis működés határa felé közelíti. Megállapítható tehát, hogy az UAS vezetésére leginkább olyan személyek alkalmasak, akik nem túlzottan nagy mozdulatokkal irányítják az UAS-t, inkább gyakrabban, de kisebb kormánymozdulatokat tesznek a szükséges térbeli helyzet eléréséhez.

A fejezetben bemutatott elméleti összefoglaló, az irányítástechnikai módszertani alapok, és a feladat megoldásához a szerző által készített MATLAB m-file jól alkalmazható más típusfeladat megoldásához is.

V. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DORF. R. C. – BISHOP R. H.: Modern Control Engineering, ISBN 0-13-031411-0, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [2] SZABOLCSI Róbert: Szabályozási rendszerek számítógépes analízise és szintézise, Szolnoki Tudományos Közlemények V, ISSN 1419-256x, (187-193) o., 2001.
- [3] SZEGEDI Péter: Repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak számítógépes analízise és szintézise, PhD értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, 2005.
- [4] SZABOLCSI Róbert: A repülőgép-vezető repülésbiztonság szempontjából kritikus paramétereinek meghatározása, Debreceni Műszaki Közlemények, V. évf., 2006/3. szám, ISSN 1587-9801, (13-24) o., Debreceni Egyetem, 2006.
- [5] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: A repülőgép-vezető kritikus paramétereinek komplex vizsgálata az oldalirányú irányítási csatornában, Repüléstudományi Közlemények, ISSN 1417-0604, XVIII. évf., 38. szám, 2006/1, (97-117) o., 2006.
- [6] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Modeling of the Human Pilot time delay Using Padé Series, International Journal of “Academic and Applied Research in Military Science AARMS”, ISSN 1588-8789, Vol. 6., Issue 3, p(405-428), 2007.
- [7] DR. HABIL. SZABOLCSI Róbert: Holtidős tagok közelítése Padé-sorokkal, A „Pilóta nélküli és szállító repülőgépek katonai alkalmazhatósága” tudományos konferencia kiadványa,

2007. április 20., Repüléstudományi Közlemények, ISSN 1417-0604, CD-ROM különszám, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Repülőműszaki Intézet, 2007.
- [8] PROF. DR. POKORÁDI László: Rendszerek és folyamatok modellezése, ISBN 978-963-9822-06-1, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.
- [9] DR. SZABOLCSI Róbert. *Handling Time Delay in Control of Unmanned Robots*, Bolyai Szemle, ISSN 1416-1443, XVII. évf. 4. szám, (47-60) o, ZMNE Bolyai János Katonai Műszaki Kar, 2008.
- [10] Dr. habil. SZABOLCSI Róbert *Pilot-in-the-Loop Problem and its Solution*, Review of the Air Force Academy, No1/2009, pp(12-22), ISSN 1842-9238, Brasov, Romania (Selected paper from the Proceedings of the International Conference „Scientific Research and Education in the Air Force” AFASES 2009, ISBN 978-973-8415-67-6, pp(1169-1181), 20-22 May 2009, Brasov, Romania).
- [11] *MATLAB® 6.5 (Release 13) – The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2002.
- [12] *CONTROL SYSTEM TOOLBOX 5.1 for Use with MATLAB® (Release 12.1)*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

V. FEJEZET

UAV EXTREMÁLIS (OPTIMÁLIS) REPÜLÉSI PÁLYÁK TERVEZÉSE, ÉS AZOK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

I. RÉSZ

A VARIÁCIÓSZÁMÍTÁS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI, ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

I. BEVEZETÉS, MOTIVÁCIÓ, PROBLÉMAFELVETÉS

A szerző célja bemutatni a klasszikus variációszámítás alapvető célját, feladatát, matematika apparátusát, és alapösszefüggéseit. A variációszámítás a Bernoulli¹²-feladat megoldására alakult ki, amely alapját képezte, és képezi mind a mai napig. A feladat, amit Johann Bernoulli fogalmazott meg, az ún. *brachisztochron (legrövidebb idő)*. A feladat megoldása során kifejlesztett matematikai apparátus a szélsőérték-számításos feladatok egész körének megoldását tette lehetővé. Az extrémális-feladatok megoldása során olyan új problémák is felmerültek, mint a vezérlés tervezése a legrövidebb átmeneti idő elérésére, a legrövidebb út megtételére, vagy például a legkisebb energiafelhasználással működő szabályozások tervezésére.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A variációszámítás matematikai elméleti összefüggéseit, és variációszámítási példákat a [2, 4, 5, 6, 7] könyvek mutatják be. A variációszámítás és az optimális szabályozási rendszerek elméletével, és gyakorlatával a [3, 8, 9] könyvek foglalkoznak. Szegedi és Békési pilóta nélküli repülőgépek hosszirányú mozgásszabályozójának tervezésére az LQR optimális tervezési módszert alkalmazta. Rabinovics bemutatja a variációszámítás matematikai elméleti összefüggéseit, és annak alkalmazását a cirkálórakéták extrémális pályatervezésére [1].

III. A VARIÁCIÓSZÁMÍTÁS ALAPÖSSZEFÜGGÉSEI

3.1. A brachisztochron – legrövidebb idő feladata

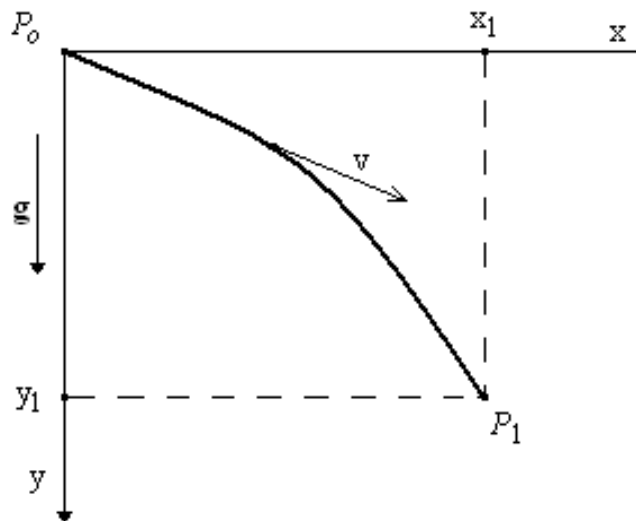
A variációszámítás a matematika, különféle függvényeken értelmezett funkcionálok extrémális értékeinek meghatározásával foglalkozó fejezete. A funkcionálok szélsőértékei lehetnek *maximumok*, vagy *minimumok*. A lineáris *funkcionál* a függvények megadott csoportjára értelmezett: a funkcionál az egyes lehetséges függvényekhez egy számértéket

¹² Johann BERNOULLI (1667-1748), svájci matematikus.

rendel. Ilyen funkcionál lehet például a független változó(oordináta) $[a,b]$ tartományán értelmezett $J(x) = \int_a^b x(t)dt$, ahol $x(t)$ folytonos függvény [4, 5, 6, 7].

A variációszámítás alapvetően a fizika, a mechanika, és más tudományok feladatainak megoldására alakult, de a XX. század tudományos-technikai kihívásai, a matematika határterületeinek kialakulása, és fejlődése, valamint a számítástudomány számos új területen tették szükségessé a variációszámítás alkalmazását. A XX. század második felében a variációszámítás új, nem klasszikus formája, az optimális rendszerek elmélete alakul ki, amely lehetővé tette a variációszámítás alkalmazását az élet számos területén [3, 9, 10].

Johann Bernoulli 1696-ban fogalmazta meg az alábbi feladatot: *a Föld homogén gravitációs mezejében (y: helyi függőleges iránya) különféle magasságokon elhelyezkedő P_0 és P_1 pontok között felvehető összes görbe közül határozzuk meg azt a görbét, ami mentén a zérus kezdeti sebességgel induló, és súrlódásmentesen lecsúszó m tömegű test minimális idő alatt érkezik P_0 kezdőpontból a P_1 végpontba. A feladat megoldásához vegyük górcső alá az 1. ábrát.*



1. ábra. A brachisztochron (legrövidebb idő) feladat.

Legyen a keresett függvény $y = y(x)$ alakú. Az energiamegmaradás törvénye értelmében:

$$m g y = m \frac{v^2}{2}. \quad (3.1)$$

A csúszás sebessége az alábbi egyenlet alapján is számítható:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{\sqrt{1 + y'^2} dx}{dt}, \quad (3.2)$$

ahol: $y' = \frac{dy}{dx}$.

A (3.2) egyenletből az idő differenciálja a következő lesz [1, 5]:

$$dt = \frac{1}{v} \sqrt{1+y'^2} dx = \frac{\sqrt{1+y'^2} dx}{\sqrt{2gy}}. \quad (3.3)$$

A keresett görbén történő mozgás idejét a (3.3) egyenlet integrálásával kapjuk meg:

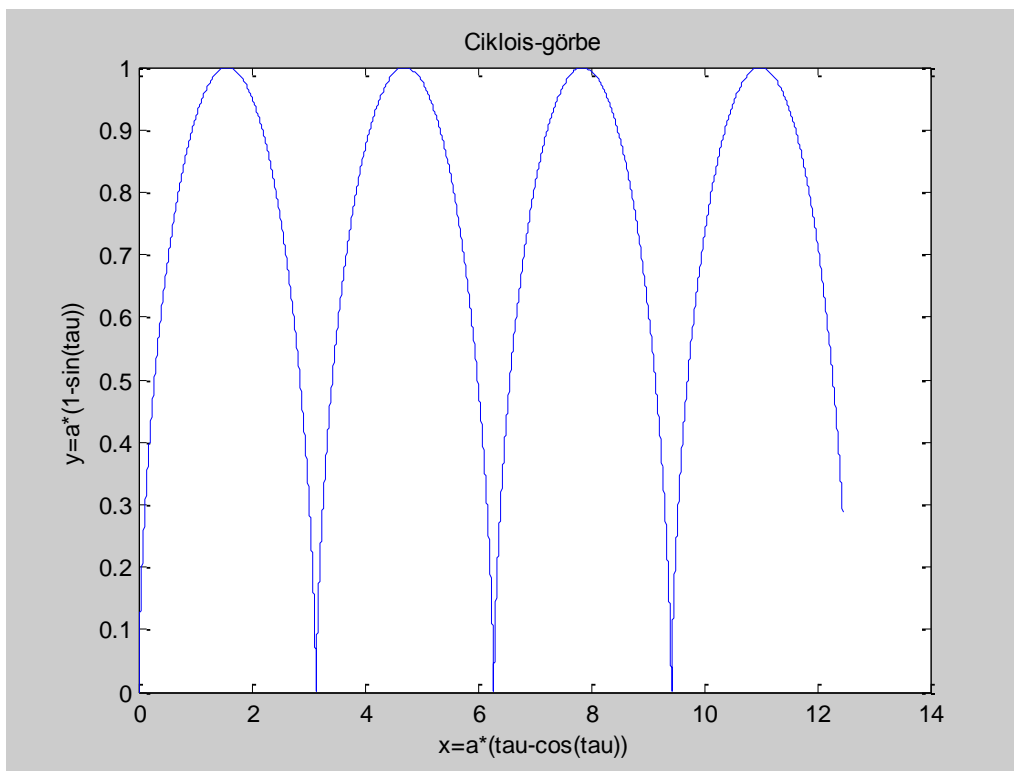
$$t|_0^T = \int_0^T \frac{\sqrt{1+y'^2} dx}{\sqrt{2gy}} = T \rightarrow \text{extremum}. \quad (3.4)$$

A kitűzött feladat megfogalmazható az alábbi módon is: *keressük azt az $y(x)$ függvényt, amely az $y(0)=0$, és az $y(x_1)=y_1$ peremfeltételek mellett biztosítja, hogy a mozgás során teljesül, hogy $T \rightarrow \min$.*

Matematikából jól ismert e feladat megoldása [1, 4, 5, 6, 7]:

$$y = a(1 - \sin(\tau)), \quad x = a(\tau - \cos(\tau)). \quad (3.5)$$

A (3.5) egyenlet alapján azt kaptuk, hogy az m tömegpont egy ciklois mentén (3.5) ér le legrövidebb idő alatt a P_0 felső pontból a P_1 alsó pontba (2. ábra).



2. ábra. A ciklois-görbe.

Az ún. legrövidebb idő feladat (*brachisztocron*) egy speciális esete a következő általános variációs számítási feladatnak: *a sík két pontján (A és B pontok) átmenő, lehetséges $y(x)$*

függvények közül, amelyek maguk is, és az $y'(x)$ függvény is folytonosak az $a \leq x \leq b$ tartományon, keressük azt a függvényt, amelyre az

$$J(x) = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad (3.6)$$

integrál (funkcionál) extrémális, más szóval, minimális, vagy maximális értéket vesz fel. Az $y(x)$ függvényt, amelyre a (3.6) funkcionál szélsőértéket vesz fel, extrémálnak is szokás nevezni. A (3.6) integrál kiterjesztése általános esetre a következő lesz:

$$J(x) = \int_a^b \Phi[x, y_1(x), y_2(x), \dots, y_n(x), y_1'(x), y_2'(x), \dots, y_n'(x)] dx, \quad (3.7)$$

ahol: $y_i' = \frac{dy_i}{dx}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

A (3.7) egyenlettel megadott matematikai feladat megoldása során új fogalmakat kellett bevezetni, mint például a variáció fogalmát, amit széles körben használunk a gerjesztett dinamikus rendszerek viselkedésének vizsgálata (pl. stabilitásvizsgálat), valamint a célba találás pontosságának vizsgálata során.

Általános esetben, az $y(x)$ függvények, amelyek közül szeretnénk kiválasztani azt, amely biztosítja valamely előre megadott funkcionál extrémumát, nem tetszőleges függvények, hanem a megoldandó feladat jellegéből eredő, újabb követelményeknek kell eleget tegernek. Ilyen követelmények lehet például az, hogy az $y(x)$ függvény folytonos, az $y'(x)$ derivált függvény folytonos, a keresett $y(x)$ függvény nem lép ki egy előre megadott területű síkidomból.

Megállapíthatjuk tehát, hogy minden egyes feladat megoldásakor meg kell határozni azon megengedett függvények osztályát, amelyen keressük az extrémalist. Az $y(x)$ ($a \leq x \leq b$) függvényt a C_n osztályú függvények csoportjába soroljuk, ha az $[a, b]$ zárt intervallumon úgy az $y(x)$ függvény, mint annak n -edik deriváltja is, egyidejűleg folytonos.

3.2. Alapfogalmak, definíciók, tételek, segédtételek

1. Az $a \leq x \leq b$ intervallumon a C_n függvényosztályba tartozó $y(x)$ és $y_1(x)$ függvények közötti n -edrendű távolság – az alábbi kifejezések közül a maximális:

$$|y_1(x) - y(x)|, |y_1'(x) - y'(x)|, |y_1''(x) - y''(x)|, \dots, |y_1^n(x) - y^n(x)|. \quad (3.8)$$

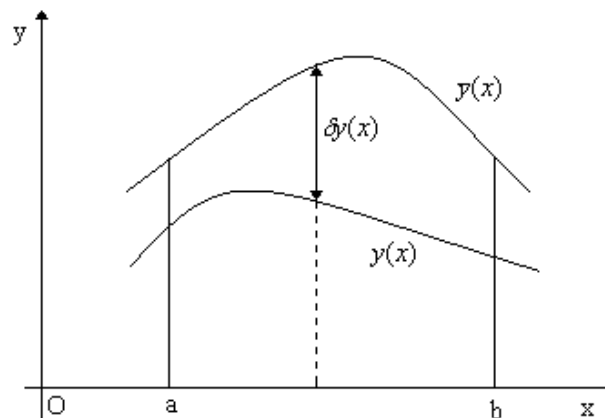
Az $\int_a^b F[x, y(x), y'(x)] dx$ alakú integrál-funkcionálok alapvető fontossággal bírnak az elsőrendű távolságok, és a C_1 osztályú függvények.

2. Az $y = y(x)$ függvény $a \leq x \leq b$ intervallumon vett n -edrendű ε -környezete: az $y = y_1(x)$ függvények összessége, amelyeknek az $y = y(x)$ függvényektől számított n -edrendű távolsága kisebb, mint ε .

3. A függvények adott csoportját jelölje γ . Az $J(\gamma)$ funkcionál abszolút extrémuma $J(\gamma_0)$:
 - a. $J(\gamma) \geq J(\gamma_0)$ esetén abszolút minimumról beszélünk;
 - b. $J(\gamma) \leq J(\gamma_0)$ esetén abszolút maximumról beszélünk.
4. A függvények adott csoportját jelölje γ . Az $J(\gamma)$ integrál $J(\gamma_0)$ extremális, amely esetén a 0 -adrendű γ_0 függvénytől a megengedett γ függvények ε távolságon belül esnek:
 - a. $J(\gamma) \leq J(\gamma_0)$ esetén erős maximumról;
 - b. $J(\gamma) \geq J(\gamma_0)$ esetén erős minimumról beszélünk [4, 5].
5. Függvény variációja – állandó független változó esetén az $y = y(x)$ függvény $\eta(x)$ növekménye (3. ábra):

$$\delta y(x) = \eta(x) = y(x) - y(x). \quad (3.9)$$

Itt megjegyezzük, hogy a variációt nem szabad összetéveszteni a függvény növekményével. A függvény (függő változó) értékének megváltozása rendszerint a független változó megváltozására vezethető vissza. A variáció pedig a függvény értékének megváltozása állandó független változó esetén [1, 3, 4, 5, 6, 7].



3. ábra. A variáció származtatása.

6. Az $J = \int_a^b F(x, y, y') dx$ integrál (funkcionál) variációja [1, 5]:

$$\delta J = \int_a^b \left[\frac{\partial F(x, y, y')}{\partial y} \delta y(x) + \frac{\partial F(x, y, y')}{\partial y'} \delta y'(x) \right] dx = \int_a^b [F_y \eta(x) + F_{y'} \eta'(x)] dx. \quad (3.10)$$

Az integrál-funkcionál ΔJ kis perturbációja kifejezhető az alábbi módon is:

$$\Delta J = J(y) - J(y) = \delta J + \varepsilon(y, y), \quad (3.11)$$

ahol $\varepsilon(y, y)$: az $y(x)$ és az $y(x)$ függvények közötti elsőrendű távolság (3. ábra).

A variáció egy másik definíciója is megadható: az $J(y + \alpha \eta)$ funkcionál α szerinti deriváltja $\alpha = 0$ teljesülése mellett. Vezessük be a

$$\Phi(\alpha) = J(y + \alpha \eta) \quad (3.12)$$

funkcionált, és végezzük el a differenciálást. Az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\Phi'(\alpha)\Big|_{\alpha=0} = \frac{d}{d\alpha} \int_a^b F(x, y + \alpha\eta, y' + \alpha\eta') dx \Big|_{\alpha=0} = \int_a^b [F_y(x, y, y')\eta + F_{y'}(x, y, y')\eta'] dx. \quad (3.13)$$

A (3.10) variáció számítását variációszámításnak is szokás nevezni [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

3.3. Egyszerű funkcionálok extremuma létezésének szükséges feltételei

Az egyszerű funkcionálok extremuma létezésének szükséges feltételeit az alábbi tételek, és segédtételek segítségével igazoljuk:

3.3. – 1. Tétel

A C_1 függvényosztályú $y(x)$ függvény az

$$y(a) = y_0, \quad y(b) = y_1 \quad (3.14)$$

kezdeti és végfeltételek mellett, a

$$J(x) = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad (3.15)$$

integrál(funkcionál) akkor, és csak is akkor vesz fel extrémális (maximum, minimum) értéket, ha az

$$J(x) = \int_a^b [F_y(x, y, y')\eta(x) + F_{y'}(x, y, y')\eta'(x)] dx \quad (3.16)$$

variáció tetszőleges $\eta(x) \in C_1$, és $\eta(a) = \eta(b) = 0$ esetére zérushoz tart. Könnyen belátható, hogy a $y(x) + \alpha\eta(x)$ osztályú függvények J funkcionálja az α paraméter függvénye, amely $\alpha = 0$ esetén minimális értéket vesz fel. Következésképpen,

$$\Phi'(0) = \int_a^b [F_y(x, y, y')\eta(x) + F_{y'}(x, y, y')\eta'(x)] dx = 0 \quad (3.17)$$

A tételt ezzel bizonyítottuk.

3.3.1. A Lagrange-lemma (segéd-tétel)

A Lagrange¹³-lemma a variációszámítás alaptétele. Ha a folytonos $\Phi(x)$ függvény ugyanolyan tulajdonságokkal bír, mint a $\eta(x) \in C_1$ függvényosztály, ahol $\eta(a) = \eta(b) = 0$, és $\forall(a \leq x \leq b)$ esetén teljesül a

¹³ Joseph Louis LAGRANGE (*Giuseppe Luigi Lagrangia*, 1736-1813), francia matematikus.

$$\int_a^b \Phi(x)\eta(x) dx = 0 \quad (3.18)$$

egyenlőség, akkor $\Phi(x) \equiv 0$. A bizonyítást az [1, 3, 4, 5, 7] irodalmakban találjuk.

3.3.2. Az első variáció

Feltételezzük, hogy az $F_{y'} = \frac{dF}{dy'}$ derivált függvény folytonos. Ebben az esetben

$$J = \int_a^b F_{y'} \delta y dx = \left[F_{y'} \delta y \right]_a^b - \int_a^b \delta y \frac{d}{dx} F_{y'} dx = 0, \quad (3.19)$$

amely egyenletből az első variáció az alábbi összefüggés alapján számítható:

$$\delta J(y) = \left[F_{y'} \delta y \right]_a^b + \int_a^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx = 0. \quad (3.20)$$

A rögzített végpontú ($x = a$, $x = b$) $y(x)$ függvényre $\delta y = 0$. Ezért a (3.20) egyenlet az alábbi alakban írható fel [1, 3, 4, 5, 7]:

$$\delta J(y) = \int_a^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx = 0. \quad (3.21)$$

3.3.3. Az Euler-Lagrange differenciálegyenlet

A (3.20) alakú integrál-funkcionál alapján könnyen belátható, hogy minden maximálandó, vagy minimálandó $y(x)$ függvény eleget tesz az alábbi egyenletnek [1, 2, 2, 4, 5, 6, 7, 8]:

$$F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = 0. \quad (3.22)$$

A (3.22) egyenletet Euler¹⁴-Lagrange (differenciál)egyenletnek is nevezzük. Általános esetben, ha $F = F(x, y, y')$, akkor a (3.22) egyenlet másodrendű differenciálegyenlet. A továbbiakban feltételezzük, hogy a $\delta y(x)$ variáció egyoldalú, vagyis $\delta y(x) \geq 0$, vagy $\delta y(x) \leq 0$.

A (3.21) variáció extremum (maximum, minimum) értékeire most igazak az alábbi összefüggések:

$$\delta J(y) \leq 0 \quad (\text{maximum } J), \quad (3.23)$$

$$\delta J(y) \geq 0 \quad (\text{minimum } J). \quad (3.24)$$

A (3.22) egyenlet, felhasználva a (3.23), és a (3.24) kifejezések a következő alakban írhatók fel:

¹⁴ Leonhard EULER (1707-1783), svájci matematikus és fizikus.

$$F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \leq 0 \quad (\text{maximum } J), \quad (3.25)$$

$$F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \geq 0 \quad (\text{minimum } J). \quad (3.26)$$

3.3. – 2. Tétel

Az $a \leq x \leq b$ szakaszon, tetszőleges $y(x)$, és $y'(x)$ függvényekre az $F = F(x, y, y')$ függvény második parciális deriváltjai is legyenek folytonos függvények. Ha a $y(x) \in C_1$ függvény biztosítja az

$$J = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad (3.27)$$

integrál-funkcionál *gyengén* extrémális értékét, akkor az $y(x)$ kielégíti az alábbi Euler-Lagrange egyenletet,

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = 0, \quad (3.28)$$

míg az $y''(x)$ második derivált függvény létezik, és $\forall x$ -re, amely esetén teljesül, hogy $F_{y'y'} \neq 0$, a derivált függvény folytonos.

Terjesszük ki vizsgálatainkat az

$$J(x) = \int_a^b F(x, y, z, y', z') dx \quad (3.29)$$

alakú kétváltozós integrálkritériumokra is. Rögzített határu (rögzített végpontú) $y(x)$, és $z(x)$ függvények esetén a (3.21) funkcionál variációja a következő lesz:

$$\delta J(y) = \int_a^b \left[\left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y + \left(F_z - \frac{d}{dx} F_{z'} \right) \delta z \right] dx. \quad (3.30)$$

A δy , és a δz variációk függetlensége miatt a (3.30) egyenletből két Euler-Lagrange differenciálegyenlet írható fel:

$$F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = 0, \quad (3.31)$$

$$F_z - \frac{d}{dx} F_{z'} = \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial z'} \right) = 0. \quad (3.32)$$

A (3.30) funkcionál extrémuma létezésének feltételei az alábbiak:

$$F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = \frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \leq 0 \quad (\text{maximum } J), \quad (3.34)$$

$$F_z - \frac{d}{dx} F_{z'} = \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial z'} \right) \geq 0 \quad (\text{minimum } J). \quad (3.35)$$

A (3.30) funkcionál extrémuma létezésének feltétele nem csak a (3.34), és a (3.35) egyenlőtlenségekkel adható meg, hanem egyidejűleg, rögzített a végpontú függvények második variációjára teljesülnie kell a Legendre¹⁵-feltételnek, míg szabad (nem rögzített) végű függvények esetén teljesülnie kell a *tranzverzalitási* feltételeknek [1, 4, 5].

3.3.4. A második variáció fogalma

Az $J(y)$ funkcionál második variációja a következő egyenlettel adható meg:

$$\delta^2 J(y) = \frac{1}{2} \int_a^b \left(F_{yy} \delta^2 y + 2F_{yy'} \delta y \delta y' + F_{y'y'} \delta y'^2 \right) dx. \quad (3.36)$$

3.3.5. A Legendre-féle szükséges feltétel

Ha az $y(x) \in C_1$ biztosítja az $J(y)$ funkcionál minimumát, akkor tetszőleges $\eta(x) \in C_1$ ($\eta(a) = \eta(b) = 0$) függvényosztályra a második variáció nem negatív, vagyis [1, 4, 5, 7]:

$$\delta^2 J(y) \geq 0. \quad (3.37)$$

Ha $y(x) \in C_1$ függvényosztály kielégíti a az $J(y)$ funkcionál maximumát, akkor

$$\delta^2 J(y) \leq 0. \quad (3.38)$$

Összegezve tehát, a (3.15) integrál-funkcionál extrémuma létezésének szükséges feltételeit az $y(x) \in C_1$ függvényosztályra az alábbiak szerint foglalhatjuk össze [1, 4, 5, 7, 8]:

1. Az $y(x) \in C_1$ függvény kielégíti a (3.22) Euler-Lagrange differenciálegyenletet;
2. az $y(x) \in C_1$ függvény kielégíti a Legendre-féle feltételeket is.

3.3.6. A tranzverzalitási feltételek

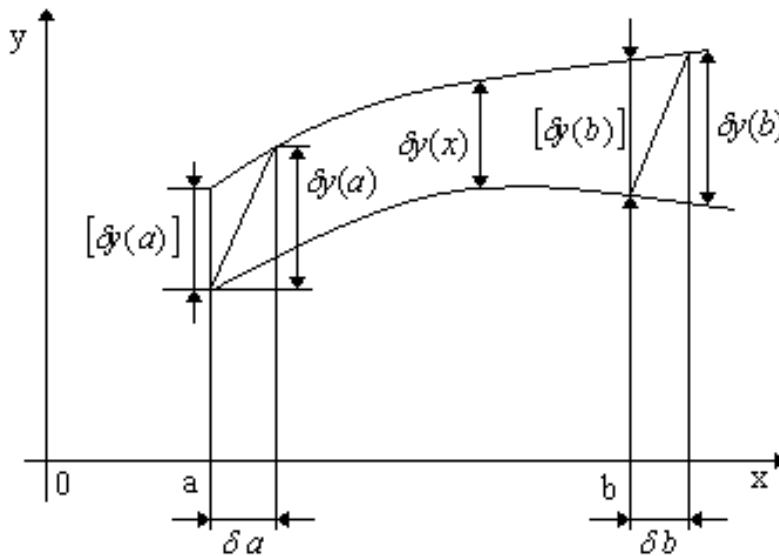
Vizsgáljuk az $J(y)$ funkcionál első variációját:

$$\delta J(y) = \left[F_{y'} \delta y \right]_a^b + \int_a^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx = 0, \quad (3.39)$$

és feltételezzük, hogy az $y(x) \in C_1$ függvény végpontjai nem rögzítettek, azok értéke változhat (4. ábra). A 4. ábrán egy mozgó (szabad) végpontú rendszer $y(x) \in C_1$ függvénye látható.

¹⁵ Adrien-Marie LEGENDRE (1752-1833), francia matematikus.

1. $[\delta y(a)]$: variáció $x = a$ esetén;
2. $[\delta y(b)]$: variáció $x = b$ esetén;
3. $\delta y(a)$: variáció $x = a + \delta a$ esetén;
4. $\delta y(b)$: variáció $x = b + \delta b$ esetén;
5. $\delta y(x)$: variáció.



4. ábra. A szabad végpontú variációszámítási feladat.

A 4. ábra alapján igazak az alábbi összefüggések [1, 5]:

$$\delta y(a) = [\delta y(a)] + y'(a)\delta a, \quad (3.40)$$

$$\delta y(b) = [\delta y(b)] + y'(b)\delta b, \quad (3.41)$$

valamint teljesülnek az alábbi egyenletek:

$$\frac{\partial J}{\partial a} \delta a = -F \delta a, \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} \delta b = -F \delta b. \quad (3.43)$$

A nem rögzített végpontú $y(x) \in C_1$ függvény funkcionálja első variációja ((3.39) egyenlet) a (3.40)-(3.43) kifejezések figyelembe vételével most a következő alakban is felírható:

$$\delta J(y) = \left(F - y' F_{y'} \right) \delta x \Big|_{x=a}^{x=b} + F_{y'} \delta y \Big|_{x=a}^{x=b} + \int_a^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx. \quad (3.44)$$

Feltételezzük, hogy a vizsgált $y(x) \in C_1$ függvény végpontjai az alábbi egyenletekkel megadott görbéken helyezkedhetnek el, értelemszerűen:

$$y = \varphi(x), \quad y = \Psi(x). \quad (3.45)$$

A (3.45) egyenletek figyelembe vételével a (3.44) első variáció a következő lesz:

$$\delta J(y) = - \left[F + (\varphi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a}^{x=b} \delta a + \left[F + (\Psi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a}^{x=b} \delta b + \int_a^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx. \quad (3.46)$$

Rögzítsük először az $y = \varphi(x)$, és a $y = \Psi(x)$ görbék tetszőleges pontjait. Egyértelmű, hogy az $y(x) \in C_1$ függvény ki kell elégítse a

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) = 0, \quad (3.47)$$

Euler-Lagrange egyenletet. Más szóval, a változó végpontú $y(x) \in C_1$ függvény funkcionálja akkor extrémális, ha

$$\delta J(y) = - \left[F + (\varphi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a}^{x=b} \delta a + \left[F + (\Psi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a}^{x=b} \delta b = 0. \quad (3.48)$$

Feltételezzük, hogy a δa , és a δb variációk egymástól függetlenek. Határozzuk meg a tranzverzálitási feltételt, amely lehetővé teszi azon szabadvégű $y(x)$ függvény meghatározását, amely kielégíti az Euler-Lagrange egyenletet, és amelynek szabad végpontjai az $y = \varphi(x)$, és a $y = \Psi(x)$ görbék mentén mozognak:

$$\left. \begin{aligned} \left[F + (\varphi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a} &= 0 \\ \left[F + (\Psi' - y') F_{y'} \right] \Big|_{x=a} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.49)$$

A kapott eredmény bizonyítását a következő tétel foglalja össze.

3.3. – 3. Tétel

Ha a $y(x)$ függvény által meghatározott γ függvény biztosítja, hogy az

$$J(\gamma) = \int_{\gamma} F(x, y, y') dx \quad (3.50)$$

funkcionál extrémális értéket vesz fel az $y = \varphi(x)$, és a $y = \Psi(x)$ görbék egy tetszőleges pontját összekötő C_1 megengedett függvényosztályon, akkor a γ függvény *extrémális*, és a végpontokon teljesül a *tranzverzálitási feltétel* [1, 3, 4, 5, 7].

3.3.7. A Weierstrass-Erdman-feltételek

Vizsgáljuk a

$$J(\gamma) = \int_{\gamma} F(x, y, y') dx \quad (3.51)$$

funkcionált az $y(a) = y_0$, és az $y(b) = y_1$ peremfeltételek mellett. Feltételezzük, hogy a C_1 megengedett függvényosztályon a (3.51) funkcionál nem vesz fel extrémális értéket. Ebben az esetben a (3.51) funkcionál extrémális értéket vehet fel a C_0 megengedett függvényosztályon, más szóval, az extemum szakaszonként folytonosan differenciálható. A töréspont koordinátája $M(x_0, y_0)$.

Feltételezzük, hogy a töréspont koordinátái variációja létezik, felhasználva a (3.44) egyenletet, és szintén feltételezzük, hogy az M pont az első extrémális végpontja, és a második extrémális kezdőpontja, a (3.44) variáció az alábbi egyenlettel adható meg [1, 5]:

$$\begin{aligned} \delta J(y) = & (F - y'F_{y'}) \delta x \Big|_{x=x_0+0}^{x=x_0-0} + F_{y'} \delta y \Big|_{x=x_0+0}^{x=x_0-0} + \\ & + \int_a^{x_0-0} \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx + \int_{x_0+0}^b \left(F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} \right) \delta y dx. \end{aligned} \quad (3.52)$$

Az extrémális $x = a$, és $x = b$ határait (peremértékeket) rögzítettnek tekintjük. A függvény $x = x_0 \pm 0$ pontokban felvett értéke alatt azt a hatásértéket értjük, amihez tart a függvény, amikor $x = x_0 \pm \varepsilon$, $\varepsilon \rightarrow 0$. Feltételezzük, hogy a δa , és a δb variációk egymástól függetlenek, az alábbi tételt fogalmazhatjuk meg [1, 3, 4, 5, 7].

3.3. – 4. Tétel

Ha két pontot, A -t és B -t, összekötő összes lehetséges szakaszonként folytonosan differenciálható görbe közül az $y = y(x)$ egyenlettel megadott szakaszonként folytonosan differenciálható γ biztosítja az J funkcionál extremumát, akkor γ véges számú extrémális húrból áll, és minden $M(x_0, y_0)$ töréspontban teljesül az alábbi feltételek:

$$\left. \begin{aligned} (F - y'F_{y'}) \Big|_{x=x_0-0} &= (F - y'F_{y'}) \Big|_{x=x_0+0} \\ F_{y'} \Big|_{x=x_0-0} &= F_{y'} \Big|_{x=x_0+0} \end{aligned} \right\}. \quad (3.53)$$

A (3.53) egyenletek a Weierstrass¹⁶-Erdman-feltételek [1, 3, 4, 5, 6, 7].

¹⁶ Karl Theodor Wilhelm WEIERSTRASS (1815-1897): német matematikus.

3.4. Feltételes extremum. Izoperimetrikus feladatok

A műszaki gyakorlatban gyakran találkozunk azzal az esettel, amikor az adott funkcionál extremumát biztosító megengedett függvényekre különféle mellékfeltételeket határozzunk meg. E feladatok csoportját feltételes szélsőérték számítási feladatoknak nevezzük. A vázolt feladatokat a Lagrange-multiplikátor módszer segítségével oldjuk meg.

Legyen a vizsgált funkcionál

$$J = \int_a^b F(x, y, z, y', z') dx \quad (3.54)$$

alakú. Keressük a térbeli görbék C_1 megengedett függvényosztályán a

$$\varphi(x, y, z, y', z') = 0 \quad (3.55)$$

differenciálegyenletnek eleget tevő azon függvényeket, amelyek biztosítják, hogy a (3.54) funkcionálnak extremuma (maximum, minimum) van. E feladat megoldásához vezessük be, és bizonyítsuk az alábbi tételt.

3.3. – 5. Tétel

Ha a γ_0 görbe eleget tesz a (3.55) egyenletnek, és biztosítja az J funkcionál extremumát, és ha ezen a görbén akár a $\varphi_{y'}$, vagy a $\varphi_{z'}$ derivált nem zérus értékű, akkor létezik olyan $\lambda(x)$ függvény, amely eleget tesz az alábbi egyenletrendszernek [1, 3, 4, 5, 7, 8]:

$$\left. \begin{aligned} H_y - \frac{d}{dx} H_{y'} &= \frac{dH}{dy} - \frac{d}{dx} \left(\frac{H}{y'} \right) = 0 \\ H_z - \frac{d}{dx} H_{z'} &= \frac{dH}{dz} - \frac{d}{dx} \left(\frac{H}{z'} \right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

ahol:

$$H = F + \lambda(x)\varphi. \quad (3.57)$$

A (3.55) és a (3.56) egyenletek megoldásaként megkapjuk a keresett $y(x)$, a $z(x)$, és a $\lambda(x)$ függvényeket. Az egyenletek megoldása során a keresett állandók meghatározásához elegendő négy kezdeti peremfeltételt megadni a kezdő-, és a végpontokban. Általános esetben, amikor a (3.55) egyenlet analógiájára adott a

$$\varphi_j(x, y, z, y', z') = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (3.58)$$

egyenletrendszer, a (3.57) egyenlet az alábbi alakban adható meg:

$$H = F + \sum_{j=1}^k \lambda_j(x)\varphi_j, \quad (3.59)$$

ahol a $\lambda_j(x)$ függvény a Lagrange-multiplikátor.

A feladat megoldása során rendelkezésre álló független egyenletek ((3.56), (3.58), (3.59)) száma megegyezik a keresett ismeretlen függvények (az $y(x)$, a $z(x)$, és a $\lambda(x)$) számával.

Vizsgáljuk azt a speciális esetet, amikor a (3.55) egyenletet az alábbi kifejezéssel helyettesítjük:

$$K = \int_a^b G(x, y, z, y', z') dx, \quad (3.60)$$

ahol K konstans.

E feladat analógiája síkbeli feladatok megoldásakor a következőképpen is megfogalmazható: *adott az $F(x, y, y')$, és a $G(x, y, y')$. Az $y = y(x) \in C_1$ megengedett függvényosztályon keressük azon függvényeket, amelyek biztosítják, hogy az*

$$\int_a^b G(x, y, y') dx, \quad (3.61)$$

integrál megadott K értéket vesz fel, míg a

$$J = \int_a^b F(x, y, y') dx, \quad (3.62)$$

funkcionál extremummal (maximum, minimum) bír a megadott függvényeken.

E feladatkörhöz tartozik például a következő feladat is: *az összes lehetséges, adott hosszúságú zárt görbe közül keressük azt, amely által határolt terület maximális. Ezt a feladatot izoperimetrikus feladatnak is nevezik [1, 3, 4, 5, 7].* A fent megfogalmazott feladat megoldását a következő tételben igazoljuk.

3.3. – 6. Tétel

Ha az $y = y(x) \in C_1$ függvény az

$$\int_a^b G(x, y, y') dx = K; y(a) = y_0; y(b) = y_1, \quad (3.63)$$

feltételek teljesülése esetén biztosítja a

$$J = \int_a^b F(x, y, y') dx, \quad (3.64)$$

funkcionál extremumát, és az $y = y(x) \in C_1$ függvény nem extremális a (3.63) funkcionálnak, akkor létezik olyan konstans λ , amely esetén a megengedett függvényosztályhoz tartozó $y = y(x) \in C_1$ függvény biztosítja az

$$L = \int_a^b H(x, y, y') dx \quad (3.65)$$

funkcionál extrémumát (maximum, minimum), ahol:

$$H = F + \lambda G. \quad (3.66)$$

A H függvényt az alábbi lineáris alakban is felírhatjuk:

$$H = \lambda_1 F + \lambda_2 G, \quad (3.67)$$

ahol λ_1, λ_2 - konstansok.

Feltételezzük, hogy $\lambda_1 \neq 0$ és $\lambda_2 \neq 0$. A fent kitűzött feladat megoldásaként kapott, és a megengedett függvények osztályához tartozó, az J funkcionál extrémumát $K = const.$ esetén biztosító megoldások, és a K funkcionál extrémumát $J = const.$ esetén biztosító $y = y(x) \in C_1$ megoldások megegyeznek.

IV. ELFAJULT FELADATOK

Tekintsük az alábbi típusú lineáris differenciálegyenletet:

$$\frac{dz}{dx} + \varphi(x, y, z) \frac{dy}{dx} + \Psi(x, y, z) = 0, \quad (4.1)$$

ahol $\varphi(x, y, z)$ és $\Psi(x, y, z)$ függvények, és az x, y, z koordináták szerinti első deriváltjaik folytonosak, úgymint az y, z változók szerinti második deriváltak is folytonosak, vagy a (4.2), vagy a (4.3) kezdeti-, és peremfeltételek teljesülése mellett [1, 3, 4, 5]:

$$\left. \begin{array}{l} x = a \text{ esetén } z = z_a \\ x = a \text{ esetén } y = y_a \\ x = b \text{ esetén } y = y_b \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} x = a \text{ esetén } y = y_a \\ x = a \text{ esetén } z = z_a \\ x = b \text{ esetén } z = z_b \end{array} \right\}. \quad (4.3)$$

A (4.1) egyenlet megoldása a (4.2), és (4.3) peremfeltételek mellett a z_b függvényt adja implicit alakban, mint az $y = y(x)$ függvény funkcionálját, vagy megoldásként kereshetjük az y_b függvényt, mint a $z = z(x)$ függvény funkcionálját.

Feltételezzük, hogy a $\varphi(x, y, z)$ és $\Psi(x, y, z)$ függvények az egyik, például a z paramétertől nem függenek explicit módon. Ebben az esetben, a z_b funkcionált a (4.1) egyenletből az alábbi módon határozhatjuk meg:

$$z_b - z_a = \int_a^b \varphi(x, y) \frac{dy}{dx} + \Psi(x, y) dx, \quad (4.4)$$

Feltételezzük, hogy

$$z_a = 0; y' = \frac{dy}{dx}; F(x, y, y') = -(\varphi y' + \Psi). \quad (4.5)$$

A (4.4) egyenlet megoldása a (4.5) egyenlet, és a (4.2)-(4.3) peremfeltételek teljesülése mellett a 3. fejezetben bemutatott variációs számítási feladatra vezethető vissza. A megfogalmazott feladat sajátossága, hogy a z_b funkcionál lineárisan függ az y' derivált függvényről. A funkcionál linearitása miatt az Euler-Lagrange egyenlet az alábbi alakra redukálódik (fajul) [1, 3, 4, 5]:

$$\Phi(x, y) = 0. \quad (4.6)$$

A (4.6) egyenlet megoldása során a megoldásként meghatározott extrémálisok családja egy lehetséges (ha ilyen függvény létezik) extrémálusra csökken, amely kielégíti a (4.6) egyenletet, a (4.2)-(4.3) peremfeltételek teljesülése mellett.

Hasonló tulajdonságokkal bír a z_b funkcionál is, valamint általános esetben a $\varphi(x, y, z)$ és a $\Psi(x, y, z)$ funkcionálok is. Ily módon, úgy a z_b , mint az y_b funkcionálok extrémálisának számítási feladata elfajultnak mondható.

V. EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A szerző összefoglalta a variációs számítás alapösszefüggéseit, tételeit, és segédtételeit. A fejezetben a szerző rámutatott azokra a lehetséges alkalmazásokra is (pl. minimális idő probléma, minimális energiafelhasználással működő szabályozások, legnagyobb távolság stb.), amelyek jól használhatóak pilóta nélküli repülőgépek repülési pályáinak meghatározásakor. A minimális energiafelhasználású rendszerek alkalmazása együtt jár a lehetséges normál repülési üzemmódokon az UAV alkalmazások minőségének lényeges javítására. Veszélyes repülési helyzeteken az optimális repülési pálya (pl. autorotációs kényszerleszállás stb.) javíthatja a repülésbiztonságot, de akár a légijármű túlélését is biztosíthatja.

VI. FELHASZNÁLT ÉS IDÉZETT SZAKIRODALOM

1. РАБИНОВИЧ, Б. И. *Вариационные режимы полета крылатых летательных аппаратов*, Машиностроение, Москва, 1966.
2. KÁRMÁN, T., BIOT, M. A. *Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására*, 2. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
3. CSÁKI, F. *Korszerű szabályozásmélelet. Nemlineáris, optimális, és adaptív rendszerek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
4. KÓSA, A. *Variációs számítás*, 2. javított kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1973.

5. KORN, G. A., KORN, T. M *Matematikai kézikönyv műszakiaknak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
6. BRONSTEIN, I. N., SZEMENGYAJEV, K. A. *Matematikai zsebkönyv mérnökök és mérnökhallgatók számára, 5. kiadás*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
7. БРОНШТЕЙН, И. Н., СЕМЕНДЯЕВ, К. А. *Справочник по математике*, Москва, Наука, 1986.
8. КРАСОВСКИЙ, А. А. (Под. ред.) *Справочник по теории автоматического управления*, Москва, Наука, 1987.
9. BROGAN, W. L. *Modern Control Theory*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
10. SZEGEDI, P., BÉKÉSI, B. *Preliminary Design of Controller of Longitudinal Motion of the Unmanned Aerial Vehicle Using LQR Design Method*, Proceedings of the 10th International Conference „Transport Means 2006”, ISSN 1822-296x , pp(324-327), Kaunas, Lithuania, 19-20 October 2006.
11. PROF. DR. SZABOLCSI, R.: A variációszámítás alapösszefüggései, és gyakorlati alkalmazása, Szolnoki Tudományos Közlemények XV, HU ISSN 2060-3002, pp(1-15) 2011.
http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Szabolcsi_Robert.pdf



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

II. RÉSZ

UAV EXTREMÁLIS REPÜLÉSI PÁLYA SZÁMÍTÁSA

I. BEVEZETÉS

A pilóta nélküli légi járműveket (UAV) széles körben használják úgy katonai-, mint nem-katonai (pl. katasztrófavédelem, közlekedési kritikus infrastruktúra megfigyelése, vagyonvédelmi feladatok, mezőgazdasági feladatok, ipari balesetek megfigyelése stb.) missziókban. Az egyes alkalmazásokban az UAVk különféle sárkányszerkezeti kialakításokkal rendelkeznek: lehetnek merevszárnyúak, vagy forgószárnyúak (helikopter, multirotor). A propulziós rendszerek lehetnek sugárhajtóművek, belsőégésű motorok, vagy villamos motorok.

Tekintettel a leendő UAV alkalmazásainkra, a szerző a villanymotoros propulziós rendszerekre korlátozza vizsgálatait. A szerző célja bemutatni a klasszikus variációszámítás gyakorlati alkalmazását pilóta nélküli légi járművek (UAV) extrémális repülési pályájának számítására, amely biztosítja, hogy egy előre megválasztott funkcionál extrémumát (minimum, maximum). A téma kiemelten fontos, mert a bemutatandó elméleti ismeretek jól használhatóak az optimális repülési pályák számítására, amely mentén biztosított például a minimális energiaigény, vagy a maximális hatótávolság.

II. ELŐZMÉNYEK

A légi járművek térbeli mozgásának matematikai modelljét az [1, 8, 11, 14] irodalmak mutatják be. E könyvek foglalkoznak úgy a merev-, mint a forgószárnyú légi járművek mozgásának vizsgálatával, valamint a stabilitási, az irányíthatósági-, és a kormányozhatósági kritériumokkal. A matematikai elméleti háttérrel a [3, 6, 7, 9, 10] könyvek adták. A hivatkozott matematikai kézikönyvek sokszor gyakorlati példákat is bemutatnak az elmélet alkalmazására.

A variációszámítás elméleti háttérrel a [4, 5, 12] foglalkozik, míg a [2] irodalom a variációszámítás alkalmazását mutatja be cirkáló rakéták extrémális pályatervezése során: a szerző kiemelt jelentőséget tulajdonít még a ballisztikus rakéták extrémális (optimális) repülési pályájának tervezésének is.

Szegedi és Békési cikkükben pilóta nélküli repülőgép teljes állapot-visszacsatolású, optimális szabályozó tervezését mutatta be az LQR optimális tervezési algoritmus felhasználásával, ami biztosítja a hosszirányban statikusan instabil UAV dinamikus

stabilitását [13]. Szabolcsi részletesen bemutatja az UAV extrémális repülési pálya tervezését.

III. UAV TÉRBELI MOZGÁSÁNAK EGYENLETEI

Az UAV lehetséges osztályaiból most egy hipotetikus merevszárnyú UAV-t vizsgáljuk meg. Vizsgálataink során feltételezzük, hogy:

- ✓ az UAV kisméretű, merev test;
- ✓ az UAV dinamikus egyenleteit anyagi pontra írjuk fel;
- ✓ az UAV tömege állandó;
- ✓ az UAV rövid idejű bevetést hajt végre földközeli magasságokon;
- ✓ az UAV szimmetrikus felépítésű;
- ✓ az UAV kis értékű állásszögeken manőverezik;
- ✓ az UAV repülési szimmetrikus
- ✓ az UAV hossz-, és oldalirányú irányítási csatornái között nincs áthatás: a térbeli mozgás a hosszirányú-, és az oldalirányú mozgásra bontható.

Az UAV hosszirányú mozgásának linearizált mozgásegyenletei a következő alakban írható fel [1, 8, 11, 14, 15]:

$$\dot{u} = X_u u + X_w w + w_o q - g \cos \Theta_o \theta + X_{\delta_{TH}} \delta_{TH}, \quad (3.1)$$

$$\dot{w} = Z_u u + Z_w w + u_o q - g \sin \Theta_o \theta + Z_{\delta_E} \delta_E, \quad (3.2)$$

$$\dot{q} = M_u u + M_w w + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_q q + M_{\delta_E} \delta_E, \quad (3.3)$$

$$\dot{\theta} = q. \quad (3.4)$$

ahol: u - hosszirányú repülési sebesség a test-koordináta rendszer hossz tengelye mentén, w - függőleges repülési sebesség a test-koordináta rendszer függőleges tengelye mentén, θ - bólintási szög, q - bólintó szögsebesség, m - az UAV repülési tömege, δ_{TH} - gázkar helyzetének változása, δ_E - magassági kormány szöghelyzet változása; Z_i , M_j - derivatív együtthatók.

Az UAV oldalirányú mozgásának linearizált mozgásegyenletei a következő alakban írható fel [1, 8, 11, 14, 15]:

$$\dot{v} = Y_v v + u_o r - w_o p - g \cos \Theta_o \phi + Y_{\delta_R} \delta_R, \quad (3.5)$$

$$\dot{p} = \frac{I_{xz}}{I_{xx}} \dot{r} + L_v v + L_r r + L_p p + L_{\delta_A} \delta_A + L_{\delta_R} \delta_R, \quad (3.6)$$

$$\dot{r} = \frac{I_{xz}}{I_{zz}} \dot{p} + N_v v + N_r r + N_p p + N_{\delta_A} \delta_A + N_{\delta_R} \delta_R, \quad (3.7)$$

$$\dot{p} = \dot{\phi} - \dot{\Psi} \sin \Theta_o, \quad (3.8)$$

$$\dot{r} = \dot{\Psi} \cos \Theta_o. \quad (3.9)$$

ahol: v - oldalirányú egyenesvonalú repülési sebesség a test-koordináta rendszer kereszt tengelye mentén, p - orsózó szögsebesség, r - legyező szögsebesség, δ_A - csűrőlapok szöghelyzet változása; δ_R - oldalkormány szöghelyzet változása; Y_i , L_j , N_k - derivatív együtthatók, I - tehetetlenségi nyomatékok.

A (3.1)-(3.9) egyenletek levezetésével kapcsolatban az [1, 8, 11, 14] irodalmak kellő mélységű elméleti ismeretet mutatnak be. Többek között, meghatározzák az egyes mozgásfajták állapotegyenleteit, valamint a rövid-, és a hosszúperiodikus mozgások definiálásával tovább egyszerűsítik a bemutatott mozgásegyenlet rendszereket.

IV. A GAZDASÁGOS GYORSÍTÁS, ÉS A GAZDASÁGOS LASSÍTÁS FELTÉTELEINEK MEGHATÁROZÁSA

A maximális távolság-, és maximális idő-funkcionálokat a következő összefüggések adják meg [2, 4, 5, 6, 15]:

$$x_v = \int_{v_k}^{v_v} \Psi[y, y'(v), v] v dv, \quad (4.1)$$

$$t_v = \int_{v_k}^{v_v} \Psi[y, y'(v), v] dv, \quad (4.2)$$

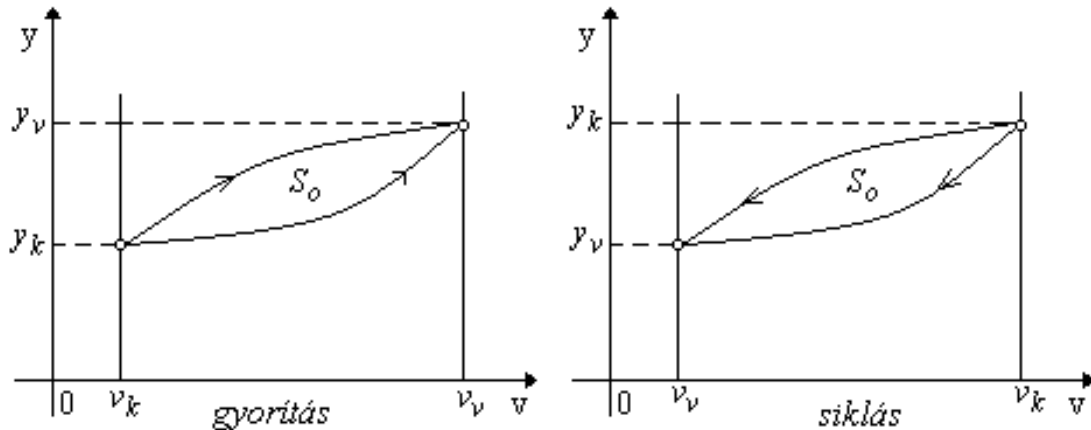
ahol $\Psi[y, y'(v), v] = \frac{1 + \frac{g}{v} y'}{R(y, v)}$ funkcionál (célfüggvény), v_k - a kezdőállapot sebessége, v_v - a végállapot sebessége, t_v - a végállapot eléréséhez szükséges idő, $R(y, v)$ - eredő légerő.

Az $y(v)$ függvény az alábbi kezdeti feltételeknek tesz eleget:

$$y = y_k, \text{ ha } v = v_k, \quad (4.3)$$

$$y = y_v, \text{ ha } v = v_v. \quad (4.4)$$

A $v(t)$ sebesség-időfüggvényt szigorúan monoton növekvőnek tekintjük a gyorsítás során, míg szigorúan monoton csökkenő a siklás során (1. ábra). Ennek következtében, a (4.1), és a (4.2) funkcionálokban a v sebesség független változó, amely gyorsításkor a v_k kezdeti, és a v_v végérték között változik, ahol gyorsításkor $v_v > v_k$, és lassításkor $v_k > v_v$.



1. ábra. UAV gyorsítás, és lassítás sebesség-diagramok.

Feltételezzük, hogy az $y(v)$ megengedett trajektóriák az (y_k, v_k) kezdőpontot és az (y_v, v_v) végpontot összekötő folytonos függvények, amelyek az S_o területen haladnak. A megengedett trajektóriákra kiegészítő feltételt adunk meg, amely szerint a repülés pályaszöge kis értékű, vagyis teljesül az alábbi egyenlet [2, 4, 5, 15]:

$$\sin \theta = \frac{1}{v} \frac{dy}{dv} \frac{dv}{dt} = \frac{y'R}{v + g y'}, \quad (4.5)$$

ahol: θ - pályaszög, $R(y, v) = P - Q(y, v)$ - eredő légerő a hossz tengely mentén, $P = \text{áll.}$ - propulziós erő, $Q(y, v)$ - légellenállás.

Legyen a pályaszög megengedett minimális értéke $\theta_1 < 0$, míg a megengedett maximális pályaszög érték $\theta_2 > 0$. Mindezek alapján az $y'(v)$ függvény a következő egyenlőtlenségi feltételnek tesz eleget [2, 4, 5, 15]:

$$\sin \theta_1 \leq \frac{y'R}{v + g y'} \leq \sin \theta_2. \quad (4.6)$$

Ezek a peremfeltételek határozzák meg a megengedett $y(v)$ függvény belső határát az S_o tartományon. A tartomány külső határait a (4.3) kezdeti feltétel esetén az

$$y' = \frac{v \sin \theta_1}{R - g \sin \theta_1}, \quad (4.7)$$

egyenlet, míg a (4.4) peremfeltétel mellett az

$$y' = \frac{v \sin \theta_2}{R - g \sin \theta_2}, \quad (4.8)$$

egyenlet adja meg [2]. A (4.7), és a (4.8) egyenlettel megadott függvények határolják az (y, v) síkon az S_o tartományt.

Fogalmazzuk meg a következő variációs számítási feladatot [2, 3, 4, 5, 6]: *a megengedett $y(v)$ függvényosztályon keressük azt a függvényt, amely biztosítja:*

- a gyorsítás során az x_v úthossz minimális (gyorsítás a minimális úthosszon a megadott repülési sebességig), és a x_v maximális siklás esetén;*
- a gyorsítás során a t_v idő minimális (gyorsítás a megadott repülési sebességig a legrövidebb idő alatt), és a t_v idő maximális a siklás során;*
- megadott t_v alatt a gyorsítás során az x_v úthossz minimális (gyorsítás a megadott repülési sebességig, megadott idő alatt, minimális út megtétele alatt), és x_v úthossz maximális megadott t_v időre a siklás során (maximális távolság megadott idő alatt a siklás során).*

4.1. Az x_v és a t_v extremuma

Az előző fejezetben bemutatott variációs számítási feladat az egyik legegyszerűbb, mivel a funkcionál explicit alakú. Ezért az extrémumok az Euler-egyenletnek eleget tevő integrálegyenletek. A (4.1), és a (4.2) integrálok integrandusai lineárisan függenek az $y'(v)$ deriválttól. Az $y(v)$ és az $y'(v)$ függvények variációit az alábbi egyenletek segítségével írhatjuk fel:

$$\delta x_v = \int_{v_k}^{v_y} \frac{v \phi_1(y, v) \delta y}{R^2} dv, \quad (4.9)$$

$$\delta t_v = \int_{v_k}^{v_y} \frac{v \phi_2(y, v) \delta y}{R^2} dv, \quad (4.10)$$

ahol:

$$\phi_1(y, v) = \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{g}{v} \frac{\partial R}{\partial v}, \quad (4.11)$$

$$\phi_2(y, v) = \frac{\partial R}{\partial y} + \frac{g}{v} \frac{\partial R}{\partial v} + \frac{g}{v^2} R, \quad (4.12)$$

Megemlítjük, hogy

$$\frac{\partial R}{\partial v} = \left. \frac{\partial R}{\partial v} \right|_{c_y = \text{áll.}} + \frac{\partial R}{\partial c_y} \frac{\partial c_y}{\partial v}, \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial R}{\partial y} = \left. \frac{\partial R}{\partial y} \right|_{c_y = \text{áll.}} + \frac{\partial R}{\partial c_y} \frac{\partial c_y}{\partial y}, \quad (4.14)$$

ahol: c_y - felhajtóerő tényező.

A S_0 területen belül elhelyezkedő extrémálisokat az alábbi egyenletek határozzák meg:

 <p>MAGYARORSZÁG MEGÚJUL</p>  <p>A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.</p>	<p>TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)</p>
---	--

$$\phi_1(y, v) = 0, \quad (4.15)$$

$$\phi_2(y, v) = 0, \quad (4.16)$$

$$\phi_1(y, v) + \chi \phi_2(y, v) = 0, \quad (4.17)$$

ahol χ - Lagrange multiplikátor.

A (4.15) egyenlet az x_v extremumát, a (4.16) egyenlet a t_v extremumát, míg a (4.17) egyenlet az x_v extremumát adja meg megadott t_v mellett. A (4.15) és a (4.16) egyenletek egyedüli megoldásként az S_o terület belső extremumát adják meg, míg a (4.17) egyenlet az S_o tartományon belül χ -ban paraméterezett görbesereg, amelyek mindegyikének megfelel egy t_v érték.

A maximális távolságú, és maximális idejű extrémális siklás feladatának megoldását az alábbi feltétel mellett kapjuk meg:

$$\frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{v}{R} \right) = 0 \text{ esetén: } x_v = x_{v \max}, \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{R} \right) = 0 \text{ esetén: } t_v = t_{v \max}. \quad (4.19)$$

A (4.18), és a (4.19) egyenleteknek az alábbi funkcionálok felelnek meg [2]:

$$\phi_1^o(y, v) = \frac{g}{v} \frac{\partial R}{\partial v}, \quad (4.20)$$

$$\phi_2^o(y, v) = \frac{g}{v} \frac{\partial R}{\partial v} + \frac{g}{v^2} R, \quad (4.21)$$

ahol: $R = -Q$.

Az extremum sajátosságainak meghatározásához elengedhetetlen a $\delta^2 x_v$, és a $\delta^2 t_v$ második variáció ismerete [2, 4, 5]:

$$\delta^2 x_v = \frac{1}{2} \int_{v_k}^{v_v} \frac{v \Omega_1(y, v) \delta y^2}{R^2} dv, \quad (4.22)$$

$$\delta t_v = \frac{1}{2} \int_{v_k}^{v_v} \frac{\Omega_2(y, v) \delta y^2}{R^2} dv, \quad (4.23)$$

ahol:

$$\Omega_j = \frac{\partial \phi_j}{\partial y}, \quad j = 1, 2. \quad (4.24)$$

Mivel a lehetséges trajektóriák közül azokat keressük, amelyek a gyorsítás során szigorúan monoton növekvő sebesség függvény, míg a siklás során szigorúan monoton csökkenő

sebesség függvények, ezért a (4.24) egyenlet figyelembe vételével a keresett extremum létezésnek feltételei az alábbiak:

$$\Omega_1 \geq 0, \Omega_2 \geq 0. \quad (4.25)$$

Mindezek alapján megállapítható, hogy az extrémális mozgás meghatározása visszavezethető a belső extrémálisokon történő mozgás vezérlési algoritmus meghatározására, vagy más szóval, a $S_o \in (y, v)$ tartományon a lehetséges belső extrémálisok meghatározására.

V. EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A szerző merevszárnyú UAV repülési pályája extremumának számításával foglalkozik. A kitűzött feladat olyan extrémális(optimális) gyorsítási-, és siklási (lassítási) pályák meghatározása, amelyen haladva az UAV maximális távolságot tesz meg, vagy maximális a repülési idő. A feladat megoldásához a szerző bemutatta az UAV térbeli mozgásának dinamikus egyenleteit, majd megfogalmazta az extremum létezésének feltételeit, és megadta az extremum jellegének (maximum, minimum) megítéléséhez szükséges egyenlőtlenségi feltételeket.

VI. FELHASZNÁLT ÉS IDÉZETT SZAKIRODALOM

1. BLAKELOCK, J. H. *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, John Wiley and Sons, New York-London-Sydney, 1965.
2. РАБИНОВИЧ, Б. И. *Вариационные режимы полета крылатых летательных аппаратов*, Машиностроение, Москва, 1966.
3. KÁRMÁN, T., BIOT, M. A. *Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására*, 2. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
4. CSÁKI, F. *Korszerű szabályozáselmélet. Nemlineáris, optimális, és adaptív rendszerek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
5. KÓSA, A. *Variációszámítás*, 2. javított kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1973.
6. KORN, G. A., KORN, T. M *Matematikai kézikönyv műszakiaknak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
7. BRONSTEIN, I. N., SZEMENGYAJEV, K. A. *Matematikai zsebkönyv mérnökök és mérnökhallgatók számára*, 5. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
8. БЮШГЕНС, Г. С. – СТУДНЕВ, Р. В. *Динамика самолёта – пространственное движение*, Машиностроение, Москва, 1983.
9. БРОНШТЕЙН, И. Н., СЕМЕНДЯЕВ, К. А. *Справочник по математике*, Москва, Наука, 1986.



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

10. КРАСОВСКИЙ, А. А. (Под. ред.) *Справочник по теории автоматического управления*, Москва, Наука, 1987.
11. MCLEAN, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall International Ltd., New York-London-Toronto-Sydney-Tokyo-Singapore, 1990.
12. BROGAN, W. L. *Modern Control Theory*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
13. SZEGEDI, P., BÉKÉSI, B. *Preliminary Design of Controller of Longitudinal Motion of the Unmanned Aerial Vehicle Using LQR Design Method*, Proceedings of the 10th International Conference „Transport Means 2006”, ISSN 1822-296x , pp(324-327), Kaunas, Lithuania, 19-20 October 2006.
14. SZABOLCSI, R. *Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek*, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, egyetemi tankönyv, 2011.
15. PROF. DR. SZABOLCSI, R.: UAV extrémális repülési pálya számítása, Szolnoki Tudományos Közlemények XV, HU ISSN 2060-3002, pp (1-7), 2011.

http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Szabolcsi_Robert_2.pdf



MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek
támogatása Kockázatok és
válaszok a tehetséggondozásban
(KOVÁSZ)

III. RÉSZ

A VARIÁCIÓSZÁMÍTÁS ÁLTALÁNOS, ELFAJULT FELADATÁNAK MEGOLDÁSA

A szerző célja bemutatni a variációszámítás általános, elfajult feladatának megoldását. A feladat matematikai megfogalmazása után megadja az extremum létezésének szükséges, és elégséges feltételeit, valamint a bizonyításhoz szükséges tételeket, és segédteteleket.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, SZAKIRODALMAK BEMUTATÁSA

A variációszámítás matematikai elméleti összefüggéseit az [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] irodalmak mutatják be, míg a variációszámítás területéről példákat az [1, 2, 3, 4, 9] irodalmak mutatnak be. Az [1] irodalom a gyakorlati alkalmazások területén főleg a pilóta nélküli légijárművekre, és az űrrakétákra koncentrál. A [9] irodalom a pilóta nélküli légijárművek extrémális pályatervezését mutatja be.

II. A VARIÁCIÓSZÁMÍTÁS ELFAJULT FELADATÁNAK BEMUTATÁSA

Vizsgáljuk meg a variációszámítás elfajult feladatát, tekintsük adottnak a következő funkcionált [1]:

$$\frac{dz}{dx} + \varphi(x, y, z) \frac{dy}{dx} + \Psi(x, y, z) = 0, \quad (2.1)$$

az alábbi kezdeti feltételek mellett:

$$z = z_0, \text{ ha } x = x_0. \quad (2.2)$$

Legyen az $y(x)$ függvény megengedett, az alábbi kezdeti, és végfeltételek mellett:

$$y(x_0) = y_0, \quad y(x_k) = y_k. \quad (2.3)$$

Feltételezzük, hogy a $\varphi(x, y, z)$, és a $\Psi(x, y, z)$ függvények folytonosak, és differenciálhatóak, az x, y, z független változók szerinti első differenciálhányadosok folytonosak, és a két függvény az y, z változók szerint kétszer differenciálhatóak.

Vizsgáljuk a variációszámítás feladatát az 1. ábrán. Az ábra alapján megállapíthatjuk, hogy az Oxy síkban az A' pontból az F' pontba történő eljutás navigációs feladata az $Oxyz$ térben az $ABCF_1$, vagy az $ABD F_2$ vonalakon történő mozgást jelenti. A $Oxyz$ térben az AB , az AD , a



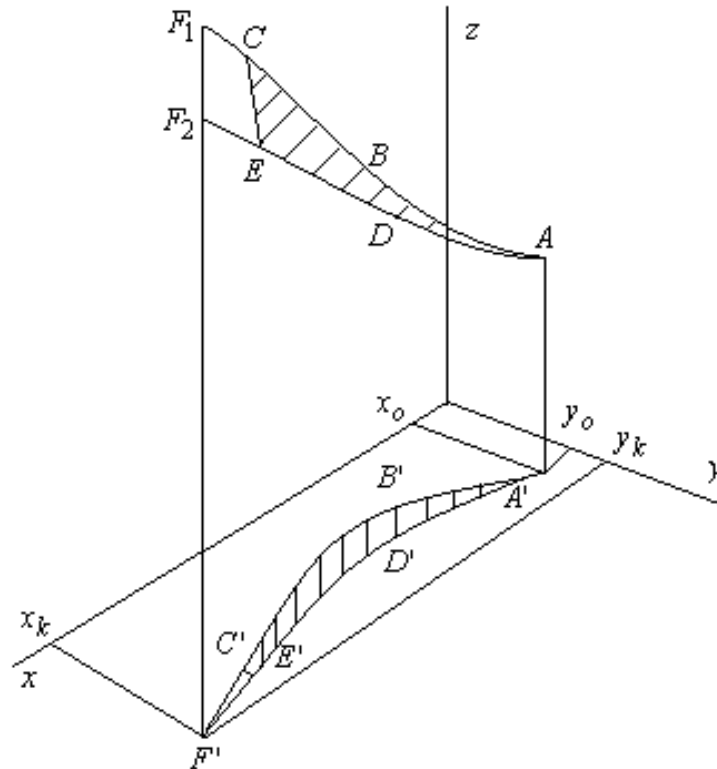
MAGYARORSZÁG MEGÚJUL



A projektek az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001
Tudományos képzés műhelyeinek támogatása Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban (KOVÁSZ)

CF_1 , és a CF_2 térbeli pályáívek határolták az S_1 területet. Az Oxy vízszintes síkban az $A'B'$, az $A'D'$, a $C'F'$, és az $E'F'$ térbeli pályaszakaszok határolták az S_2 területet.



1. ábra. (Készítette: Szabolcsi, R.)

Az 1. ábrán látható pályáíveket minden egyes esetben, az $y(x)$, és a $z(x)$ függvények folytonossági feltételeiből szokás meghatározni, amelyek segítségével az integrálás állandói meghatározhatóak [1]. A (2.1) egyenlet - a (2.2) kezdeti feltételek mellett - lehetővé teszi az $y(x)$ függvénytől függő z_k funkcionál meghatározását. E feladat abban tűnik ki, hogy a fenti függvény (kapcsolat) explicit módon nem írható fel.

Cseréljük fel szerepükben az $y(x)$ és a $z(x)$ függvényeket, valamint vezessük be az alábbi kezdeti feltételeket,

$$y(x_0) = y_0. \quad (2.4)$$

és peremfeltételeket:

$$z(x_0) = z_0; z(x_k) = z_k. \quad (2.5)$$

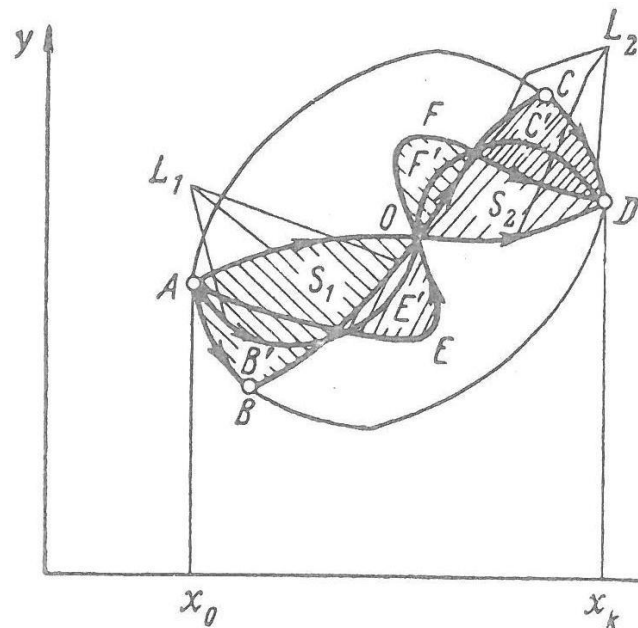
További vizsgálataink során feltételezzük, hogy az $\frac{1}{\varphi(x, y, z)}$, és az $\frac{1}{\psi(x, y, z)}$ függvények ugyanazon tulajdonságokkal rendelkeznek, mint az $\varphi(x, y, z)$, és az $\psi(x, y, z)$ függvények.

Ebben az esetben feltételezzük, hogy a (2.4) kezdeti feltételekkel megadott (2.1) egyenlet a $z(x)$ egyenleten implicit alakban adja meg az $y_k = y(x_k)$ funkcionált. Fogalmazzuk meg most a variációs számítás feladatát:

A megengedett függvények osztályán határozzuk meg azt az $y(x)$ függvényt, amely biztosítja a (2.2) kezdeti feltételekkel megadott z_k funkcionál maximális (minimális) értékét [1, 6, 7, 8]. Hasonló módon, a megengedett $z(x)$ függvényeken keressük a (2.4) kezdeti feltételekkel megadott y_k funkcionál maximális (minimális) értékét.

III. A Z_K FUNKCIONÁL ELSŐ, ÉS MÁSODIK VARIÁCIÓINAK SZÁMÍTÁSA.

Vizsgáljuk meg az $Oxyz$ térben két lehetséges függvényt, amelyek közötti távolságot jelölje $\bar{\delta}r(x)$, amelynek komponensei $\delta y(x)$, és $\delta z(x)$. A $\bar{\delta}r(x)$ vektorok összessége a két függvény között lineáris felületet alkot, amelynek a vízszintes síkra képzett vetületét vizsgáljuk meg a továbbiakban (2. ábra).



2. ábra. (Forrás: РАБИНОВИЧ, Б. И. [1]).

A térbeli pályák vízszintes síkra vetített nyomvonalait jelölik az $ABOCD$, és az $AB'E'OF'C'D$ vonalak (2. ábra). Kiindulva a (2.1) funkcionálból, határozzuk meg a z_k funkcionál növekményét, ha az $ABOCD$ vonalról áttérünk az $AB'E'OF'C'D$ vonalra:

$$\Delta z_k = \sum_i \iint_{S_1^i} \Phi(x, y, z) dx dy - \sum_j \iint_{S_2^j} \Phi(x, y, z) dx dy, \quad (3.1)$$

$$\Phi(x, y, z) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{y=\text{áll.}} - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}} \quad (3.2)$$

A (3.2) egyenlet alapján igazak továbbá az alábbi összefüggések is [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{y=\text{áll.}} &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{y=\text{áll.}, z=\text{áll.}} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{y=\text{áll.}} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=\text{áll.}} &= \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=\text{áll.}, z=\text{áll.}} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

A (2.1) funkcionál alapján felírható, hogy:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{y=\text{áll.}} = -\Psi; \quad -\frac{\partial z}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}} = -\varphi. \quad (3.4)$$

A (3.2) egyenlet, figyelembe véve a (3.3)-(3.4) egyenleteket, a következő alakban is felírható:

$$\Phi(x, y, z) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \varphi \frac{\partial \Psi}{\partial z} - \Psi \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (3.5)$$

A (3.5) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a (3.5) egyenlet nem függ az $y'(x)$, vagy a $z'(x)$ deriváltaktól.

Határozzuk meg a Δz_k funkcionál δy variációhoz számított növekmény fő részét, a közelítést másodrendű tagokkal elvégezve. Vezessük be az alábbi jelöléseket [1, 3]:

$$\begin{aligned} y(x) - y^o(x) &= \eta(x) \\ z(x) - z^o(x) &= \zeta(x) \end{aligned}, \quad (3.6)$$

ahol $y^o(x)$, és $z^o(x)$ a kezdeti vonalaknak felelnek meg, míg az $y(x)$, és a $z(x)$ hozzájuk közeli függvények.

Az $\eta(x)$ és a $\zeta(x)$ függvények az alábbi egyenlőtlenségi korlátozások alá esnek:

$$\begin{aligned} 0 &\leq |\eta(x)| \leq |\delta y(x)| \\ 0 &\leq |\zeta(x)| \leq |\delta z(x)| \end{aligned} \quad (3.7)$$

A $\Phi(x, y, z)$ függvényt írjuk fel a következő alakban [1, 2, 3, 4, 5, 6]:

$$\Phi(x, y, z) = \Phi[x, y, z, (y)] = \Phi(x, y^o, z^o) + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}, y=y^o} \eta(x) + O(\rho^2), \quad (3.8)$$

ahol a (3.4) feltételeknek megfelelően:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}, y=y^o} &= \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}, z=\text{áll.}} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{x=\text{áll.}, y=\text{áll.}} \frac{\partial z}{\partial y} \Big|_{x=\text{áll.}} \right) \Big|_{y=y^o} = \\ &= \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{y=y^o}; \quad \rho = \sqrt{\eta^2 + \zeta^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

A fenti megfontolások alapján a (3.1) egyenlet – másodrendű közelítéssel - a következő módon is megadható [1, 3]:

$$\Delta z_k = \int_{x_o}^{x_k} \Phi(x, y, z) \delta y dx = \frac{1}{2} \int_{x_o}^{x_k} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \delta y^2 dx = \delta z_k + \delta^2 z_k, \quad (3.10)$$

A z_k funkcionálnak a megengedett $y(x)$ függvény deriváltjához számított első, és második variációja – a (3.10) egyenlet alapján – most a következő egyenletekkel adható meg [1, 3]:

$$\delta z_k = \int_{x_o}^{x_k} \Phi(x, y, z) \delta y dx, \quad (3.11)$$

$$\delta^2 z_k = \frac{1}{2} \int_{x_o}^{x_k} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \delta y^2 dx. \quad (3.12)$$

A z_k funkcionál extremumának számítása a (3.1), és a (3.10)-(3.12) egyenletek alapján történik.

Könnyen belátható, hogy a (2.1) egyenletet felírva a

$$\frac{dy}{dx} + \varphi^*(x, y, z) \frac{dz}{dx} + \Psi^*(x, y, z) = 0, \quad (3.13)$$

alakban,

és, figyelembe véve a (2.4) kezdeti, és a (2.5) peremfeltételeket, a Δy_k funkcionál a következő összefüggéssel adható meg:

$$\Delta y_k = \sum_i \iint_{S_1^i} \Phi^*(x, y, z) dx dy - \sum_j \iint_{S_2^j} \Phi^*(x, y, z) dx dy, \quad (3.14)$$

ahol:

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{\varphi^2} \Phi(x, y, z). \quad (3.15)$$

IV. A z_k FUNKCIONÁL EXTREMUMÁNAK SZÜKSÉGES, ÉS ELÉGSÉGES FELTÉTELEI

Feltételezzük, hogy a megengedett függvények osztályára teljesül, hogy a keresett vonalak végei a $\Phi = 0$ felületen fekszenek, más szóval,

$$\begin{aligned}\Phi(x_0, y_0, z_0) &= 0 \\ \Phi(x_k, y_k, z_k) &= 0\end{aligned}\quad (4.1)$$

4.1. 1. Tétel

A z_k funkcionál *gyenge* maximuma létezésének feltétele az alábbi összefüggéssel adható meg [1, 3, 8]:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} \leq 0. \quad (4.2)$$

A z_k funkcionál *gyenge* minimuma létezésének feltétele az alábbi összefüggéssel adható meg [1, 3, 8]:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} \geq 0. \quad (4.3)$$

A fenti feladat lehetővé teszi megoldást a folytonos első deriválttal rendelkező folytonos függvények osztályán.

Ha a z_0 , az y_0 , és az y_k kezdeti feltételek mellett a keresett extrémális végpontjai nem esnek a $\Phi(x, y, z) = 0$ felületre, más szóval, a (4.1) kezdeti feltételek nem teljesülnek, akkor vizsgáljuk meg a következő tétel teljesülését.

4.1. 2. Tétel

A z_k funkcionál *gyenge* maximuma létezésének szükséges feltétele, ha a keresett extrémális részben a nyitott S tartományban helyezkedik el [1, 3]:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} \leq 0. \quad (4.4)$$

Az S_0 tartomány C határvonala mentén vesz fel értéket az extrémális, akkor igazak az alábbi egyenlőtlenségek [1, 3, 4, 5, 6]:

$$\Phi(x, y, z) \geq 0, \text{ ha } \delta y < 0, \quad (4.5-a)$$

$$\Phi(x, y, z) \leq 0, \text{ ha } \delta y > 0, \quad (4.5-b)$$

ahol δy az adott határvonalon megengedett első variáció.

A z_k funkcionál *gyenge* minimuma létezésének szükséges feltételei az alábbiak:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} \geq 0, \quad (4.6)$$

$$\Phi(x, y, z) \leq 0, \text{ ha } \delta y < 0, \quad (4.7-a)$$

$$\Phi(x, y, z) \geq 0, \text{ ha } \delta y > 0. \quad (4.7-b)$$

Az előző két tétel a (3.11), és a (3.12) variációk alapösszefüggéseiből, és értelméből is következik. A (3.10) variációnövekmény egyenlete alapján bebizonyítható a következő tétel is.

4.1. 3. Tétel

A z_k funkcionál *erős* maximuma létezésének szükséges feltétele, ha a keresett extrémális részben a nyitott S tartományban helyezkedik el [1, 3]:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} < 0. \quad (4.8)$$

Az S_0 tartomány C határvonala mentén vesz fel értéket az extrémális, akkor igazak az alábbi egyenlőtlenségek [1, 3, 4, 5, 6]:

$$\Phi(x, y, z) > 0, \text{ ha } \delta y < 0, \quad (4.9-a)$$

$$\Phi(x, y, z) < 0, \text{ ha } \delta y > 0, \quad (4.9-a)$$

ahol δy az adott határvonalon megengedett első variáció.

A z_k funkcionál *erős* minimuma létezésének szükséges feltételei az alábbiak:

$$\Phi(x, y, z) = 0; \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} > 0, \quad (4.10)$$

$$\Phi(x, y, z) < 0, \text{ ha } \delta y < 0, \quad (4.11-a)$$

$$\Phi(x, y, z) > 0, \text{ ha } \delta y > 0. \quad (4.11-b)$$

ahol δy az adott határvonalon megengedett első variáció.

Ha $\varphi = \varphi(z)$, vagyis φ nem függ az x és az y független változóktól, akkor a (4.8) feltétel az alábbi alakban is felírható [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 \quad (4.12)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{\Phi=0} < 0, \quad (4.13)$$

ahol:

$$\Psi = \frac{\psi}{\varphi}; \quad \Phi = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\psi}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (4.14)$$

Összehasonlítva a (3.1) és a (3.14) egyenleteket megállapíthatjuk, hogy a z_k funkcionál (3.2) és (3.3) feltételek mellett meghatározott maximuma létezésének feltételei megegyeznek az y_k funkcionál minimuma létezésének feltételeivel [1, 2, 3].

A 3. tétel teljesülése mellett, feltételezzük, hogy a $z = f(x, y)$ függvény eleget tesz a $\Phi[x, y, f(x, y)] = 0$ egyenletnek, valamint mindkét független változó tekintetében szigorúan monoton, és $\Phi > 0$ esetén a $z = f(x, y)$ felület felett, míg $\Phi < 0$ esetén a $z = f(x, y)$ felület alatt halad. Feltételezzük továbbá, hogy a megengedett $y(x)$ függvényosztályra a $z(x)$ monoton.

Vezessük be a következő jelöléseket:

1) $y = y_o^*$ legyen a

$$\Phi(x_o, y, z_o) = 0. \quad (4.15)$$

egyenlet gyöke;

2) $y = y_k^*$ legyen - $x = x_k$ esetére - az $y = y_o^*$, $x = x_o$, $z = z_o$ kezdeti feltételek mellett a

$$\frac{dz}{dx} + \varphi(x, y, z) \frac{dy}{dx} + \psi(x, y, z) = 0 \quad (4.16)$$

$$\Phi(x, y, z) = 0$$

egyenlet parciális megoldása.

Az extrémális mozgáspályák jellege függ a kezdeti pont x_o , y_o , a végpont x_k , y_k koordinátáinak az x_o , y_o^* , és az x_k , y_o^* koordinátájú pontok helyzetétől, más szóval, rögzített végpontú x_k , y_k koordináták esetére a kezdeti pont és a $\Phi(x, y, z) = 0$ felület egymáshoz képest felvett helyzetétől.

Az extrémális mozgás pályán történő mozgás jellegét a kezdeti és a végpont

$$\Phi(x, y) = 0. \quad (4.17)$$

egyenlettel megadott vonalhoz képest felvett helyzete határozza meg [1, 2, 3].

V. ÖSSZEFOGLALÁS, EREDMÉNYEK

A légi járművek pályatervezése során gyakran törekszünk az extrémális pályán történő repülésre. Ezzel lehetővé válik olyan repülési-, és navigációs feladatok megoldása, mint a repülés a legrövidebb idő alatt, repülés a legrövidebb úton, repülés a legnagyobb távolságra, repülés minimális energiafelhasználással, repülés a legkisebb repülési magasságon. A kisméretű pilóta nélküli légi járművek repülése általában alacsony repülési magasságon valósul meg, ahol fennáll a veszélye a természetes-, és a mesterséges tereptárgyakkal való összeütközés veszélye. A pályatervezés során akár több tényezőt is figyelembe kell venni, és ebben az esetben, háttérbe szorulhat pl. a minimális energiafelhasználással végrehajtott repülés követelménye, és előtérbe kerül az összeütközés kizárását, vagy annak valószínűségét minimalizáló repülési pályák tervezése. Különösen fontos ez abban az esetben, ha az UAV üzemeltetése olyan repülőtérről történik, ahol más légi járművek is használják a légtérrel.

VI. FELHASZNÁLT ÉS IDÉZETT SZAKIRODALOM

- [1] РАБИНОВИЧ, Б. И. *Вариационные режимы полета крылатых летательных аппаратов*, Машиностроение, Москва, 1966 (orosz nyelven).
- [2] CSÁKI, F. *Korszerű szabályozásmélelet. Nemlineáris, optimális, és adaptív rendszerek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- [3] KÓSA, A. *Variációszámítás*, 2. javított kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1973.
- [4] KORN, G. A. - KORN, T. M *Matematikai kézikönyv műszakiaknak*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [5] BRONSTEIN, I. N., SZEMENGYAJEV, K. A. *Matematikai zsebkönyv mérnökök és mérnökhallgatók számára*, 5. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [6] БРОНШТЕЙН, И. Н. - СЕМЕНДЯЕВ, К. А. *Справочник по математике*, Москва, Наука, 1986 (orosz nyelven).
- [7] КРАСОВСКИЙ, А. А. (Под. ред.) *Справочник по теории автоматического управления*, Москва, Наука, 1987 (orosz nyelven).
- [8] PROF. DR. SZABOLCSI, R.: A variációszámítás alapösszefüggései, és gyakorlati alkalmazása, Szolnoki Tudományos Közlemények XV, HU ISSN 2060-3002, pp(1-15) 2011.
http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Szabolcsi_Robert.pdf
- [9] PROF. DR. SZABOLCSI, R.: UAV extrémális repülési pálya számítása, Szolnoki Tudományos Közlemények XV, HU ISSN 2060-3002, pp (1-7), 2011.
http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Szabolcsi_Robert_2.pdf
- [10] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: A variációszámítás általános, elfajult feladatának megoldása, Szolnok, 2012. április 12., Repüléstudományi Közlemények, 2012/2., ISSN 1789-770X, pp(349-356). <http://www.szrfk.hu/rtk/index.html>