

dc_2008_22

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
IX. Gazdaság- és Jogtudományok Osztály
Hadtudományi Bizottság

**ÁLLAMI CÉLÚ, KISMÉRETŰ PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰ
RENDSZEREK KONCEPCIONÁLIS-, ÉS SZÁMÍTÓGÉPPEL
TÁMOGATOTT ELŐZETES TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA**

MTA doktori értekezés tézisei

Szabolcsi Róbert

Budapest, 2022

TARTALOMJEGYZÉK

I. A KUTATÁSI TÉMA BEMUTATÁSA	5
II. AZ ELVÉGZETT KUTATÁSOK	9
III. A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA, TÉZISEKET ALÁTÁMASZTÓ PUBLIKÁCIÓK	11

I. A KUTATÁSI TÉMA BEMUTATÁSA

A pilóta nélküli légi járművek (UAV) és a pilóta nélküli légi jármű rendszerek (UAS) koncepcionális, előzetes tervezése, majd a prototípus gyártás és fejlesztés már hosszú ideje foglalkoztatja a szakembereket. Már több mint egy évszázados múltra tekint vissza az Aerial Target (1916, Anglia) és a „Kettering Bug” (1918, USA) pilóta nélküli légi járművek fejlesztésének története.

Bár az I. Világháborúban az A. M. Low vezette projekt (Aerial Target) Angliában nem hozott átütő sikert a légi háborúban, a projektet mégis tovább folytatták, és 1924-ben A. M. Low kiépítette az első megbízhatóan működő rádiókapcsolatot a földi irányító állomás (GCS) és az UAV között, így elsőként építette meg a mai modern UAS rendszerek egyik prototípusát.

A Kettering „Bug” légi torpedó navigációs rendszere a Sperry cég pneumatikus giroszkópjaira épült. A Kettering „Bug” UAV 1918 októberében teszt-repüléseket is végrehajtott, és hat kísérletből két találatot ért el, azonban az I. Világháború befejezését követően a fejlesztés háttérbe szorult, de ezután még hosszú ideig titkosak maradtak a projekt adatai és eredményei.

1920-ban a Fairey Queen (Anglia) célrepülőgépre első alkalommal használták a *drone* kifejezést. A célrepülőgépet a földi légvédelmi gépágyúkezelők kiképzési célú légi lövészetek során használták a hagyományos, rendszerint vontatott légi célok helyett. 1933-ban és 1934-ben több Fairey Queen repülőgépet alakítanak át pilóta nélküli vontatott légi céllá, amelyek közül egyet képessé tesznek a rádió távirányításra is, így az rádió távirányítással, önállóan repülhetett.

Az eltelt egy évszázadban számos előnyét mutatta meg az UAV/UAS, amelyek mára lehetővé tették a meglehetősen széleskörű alkalmazást úgy az állami- (pl. honvédelmi-, belügyi-, természetvédelmi-, energetikai-, telekommunikációs-, NAV-, és egyéb), mint a nem állami (szabadidős célú-, hobbi-, mezőgazdasági-, vagyonvédelmi-, és egyéb) alkalmazások területén.

A hazai UAV fejlesztések is több évtizedes múltra tekintenek vissza. 1990-ben csehszlovák-magyar együttműködés keretében elkezdődik a Szojka-III magyar fejlesztése. A kor színvonalát sokszor meghaladó képességei ellenére a Szojka-III-t Magyarországon nem állították hadrendbe, de a Csehországban még 2011-ig szolgált katonai felderítési feladatokat, amikor is – naptári üzemidejét elérve – kivonták a hadrendből.

1995-re hazai mérnökök megtervezték és megépítették az első magyar UAV-t, a *Denevért*. Az UAV újszerű sárkányszerkezeti kialakítással rendelkezett, de a maga képességeivel nem ért el átütő sikert a katonai vezetői berkekben. Bár 1996-ban a Haditechnikai Intézet veszi szárnyai alá a fejlesztési projektet, de az források hiányában előbb megfeneklett, majd teljesen le is állt.

Később új lendületet vette az UAVk hazai fejlesztése, és 2004–2005-re sikerült kifejleszteni a METEOR-1, METEOR-2 és a METEOR-3 UAV-kat, amelyeket légi lövészeteken légi célyanyagként, *drónként* használtak légvédelmi rakétalövészeti gyakorlatokon.

2008-2009-ben a BHE Hungary Ltd, a BME és az ÓE kutatói új, BXAP15 kódjelű UAVt fejlesztett ki, amely sikeres teszt-repüléseket hajtott végre.

2009-ben új igény fogalmazódott meg léci célok (*drónok*) tekintetében, és elkezdődött a METEOR UAV-k új típusának kifejlesztése, amelyek képesek nagyobb repülési magasság és nagyobb repülési sebesség elérésére, mint a korábbi METEOR UAV típusok. Az új kifejlesztendő UAV a „METEOR-3MA” kódjelet kapta.

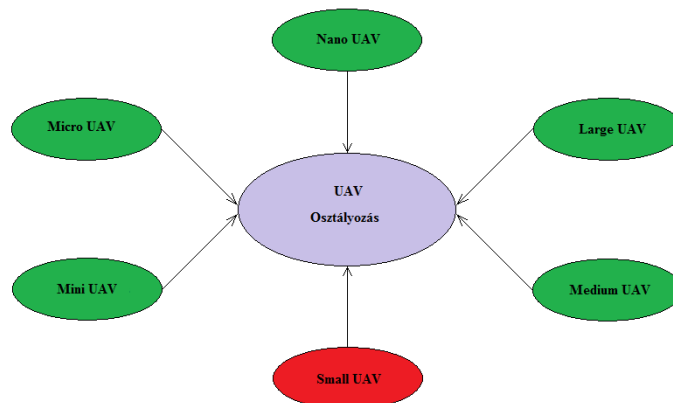
Az elmúlt évek kiemelkedő UAV fejlesztéseit a HM EI Zrt, amely kifejlesztette az Ikran, a Bora, a Nemere, az Orkán felderítési célú, illetve légi célként használt METEOR-3MA és a MI-8 UAV-kat.

A nem állami célú alkalmazású és hazai fejlesztésű UAVk egyelőre nem értek el hasonló sikereket, mint az állami célú UAVk, azonban várhatóan ezek az alkalmazások is rohamos ütemben fejlődnek, és gyors lesz majd az elterjedésük az élet számos területén (áruszállító UAVk, logisztikai UAVk, klímakutató UAVk ...).

A kutatási téma meghatározása

A dolgozat katonai alkalmazású, kisméretű UAV/UAS rendszerek (1. ábra) koncepcionális-, és előzetes tervezésével, valamint az UAVk fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszereinek, illetve

robotpilótáinak előzetes, számítógépes tervezésével foglalkozik, amelyek képesek úgy normál, mint veszélyes repülési helyzetben irányítani, és biztonságosan leszállítani az UAVt.

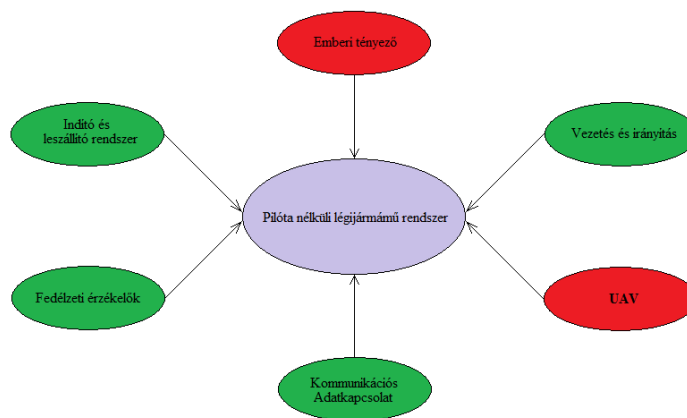


1. ábra. A pilóta nélküli léggérművek osztályozása

Kutatási célok

A kutatási célok az alábbi fontosabb területekre fókuszálnak:

1. az UAV/UAS rendszerek alrendszerének, és fontosabb elemeinek meghatározása (2. ábra);
2. az UAV repülésdinamikai modelljeinek meghatározása;
3. az UAVk automatikus repülésszabályozó rendszereinek előzetes, számítógépes tervezése klasszikus, és modern módszerek felhasználásával;
4. a repülési környezet (légköri turbulencia) matematikai modellezése;
5. holtidők lineáris közelítése;
6. holtidős zárt szabályozási rendszerek vizsgálata (PiL);
7. UAV típus-, és légialkalmassági követelményrendszerének felállítása.



2. ábra. A pilóta nélküli léggérmű rendszer fontosabb alrendszerei

Kutatói hipotézisek

A kutatói hipotéziseim az alábbiak:

1. az UAV/UAS rendszerek kiemelkedően fontosak számos katonai célú alkalmazásban;
2. az UAV kezelők alkalmasságának vizsgálatára a holtidő meghatározása megfelelő módszer;
3. a holtidő Padé-féle lineáris approximációja alkalmas a holtidős rendszerek modellezésére;
4. az UAV repülési környezetének modellezésére megfelelő módszer a légköri turbulencia matematikai modellezése;
5. az UAVk automatikus repülésszabályozó rendszereinek előzetes, számítógépes tervezése klasszikus, és modern módszerek felhasználásával;
6. a rendelkezésre álló hazai-, és nemzetközi tapasztalatok alapján az UAV tanúsítási rendszere létrehozható.

Kutatási módszerek

Az értekezésem elkészítése során az alábbi módszerekre támaszkodtam:

1. Szakirodalom elemzése;
2. Nemzetközi eredmények összegzése, helyzetelemzés;
3. Hazai eredmények összegzése, helyzetelemzés;
4. Számítógéppel támogatott rendszeranalízis;
5. Számítógéppel támogatott tervezés.

Eszközök

1. A vizsgált UAV: merevszárnyú, klasszikus aerodinamikai elrendezésű és irányítású, villamos hajtású, kisméretű, merev szerkezetű repülőgép (pl. Trainer-60 'Boomerang')
2. Identifikált UAV matematikai modellek (Trainer-60 'Boomerang')
3. MATLAB[®], Simulink[™], és toolbox-ok:
 - a. Control System Toolbox;
 - b. Control System Designer;
 - c. Control System Tuner;
 - d. MPC Designer;
 - e. Robust Control Toolbox;
 - f. Optimization Toolbox;
 - g. Signal Processing Toolbox;
 - h. Aerospace Blockset;
 - i. Aerospace Toolbox.

Várható eredmények és azok alkalmazása

A dolgozat eredményei az alábbi területeken hasznosíthatóak:

1. UAS rendszerek tervezése;
2. Sztochasztikus automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezése és vizsgálata;
3. Holtidős automatikus repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak előzetes tervezése és vizsgálata.

II. AZ ELVÉGZETT KUTATÁSOK

Az értekezés 1. fejezete röviden bemutatja a kutatási témát, megfogalmazza a motivációt, és leírja a megoldandó problémákat. Az értekezés 2. fejezete részletesen foglalkozik a tudományos előzményekkel, és bővebben kifejti a kutatási témát, megfogalmazza a kutatási célokat, nevesíti a kutatói hipotéziseket, a kutatási módszereket és az alkalmazott eszközöket, valamint a várható eredményeket.

A dolgozat 3. fejezetében bemutattam egy országos, reprezentatív, alapvetően szakmai-tudományos célú felmérés eredményeit, amelyek nagyban segíthetik az UAV/UAS tervezők, és a tanúsító szakemberek munkáját. A kutatás eredményeire és fontosabb megállapításaira támaszkodva lefektettem egy új, a perimetrikus védelmi rendszerek elemeként szolgáló, autonóm, multirotoros UAV rendszer koncepcionális alapjait, és azonosítottam a rendszertervezés fontosabb lépéseit, amelyek elvezethetnek a prototípus UAS rendszerhez.

Az értekezés 4. fejezetének célja, hogy segítse az UAV/UAS rendszerek identifikációs célú teszt-repüléseinek tervezését, és szervezését, amelyek segítségével identifikációra alkalmas idősorokat veszünk fel, és felhasználva e dolgozat által bemutatott dinamikus modelleket (pl. SISO, MIMO, holtidő-mentes, vagy holtidős stb.), identifikációs célú számítógépes programok segítségével (pl. MATLAB® System Identification Toolbox) az UAVk térbeli mozgásának matematikai modellje már identifikálható. Az identifikált modellek ismerete szükséges feltétele az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszereinek tervezése során. E fejezet foglalkozik továbbá az UAVk külső zavarásainak (pl. légköri turbulencia) matematikai modellezésével, valamint a dinamikus rendszerek paraméterbizonytalanságainak modellezésével is. Nem szorul különösebb bizonyításra, hogy a külső környezet alapvetően befolyásolja a repülési feladat végrehajtásának sikerességét és hatékonyságát, és az is ismert, hogy akár már a MALE UAV kategóriában a turbulenciából eredő légerők számottevő törzs, illetve szárny deformációt idéznek elő, amelyeket még a tervezések koncepcionális szakaszában modellezni, vizsgálni szükséges.

A hazai UAV/UAS fejlesztések egyik lehetséges gátja a szabályozási hiányosságok megléte, így a dolgozat 5. fejezetének egyik fontos célja, hogy segítséget nyújtson olyan kérdések megoldásában, ami a hazai szabályozó környezetben nem megoldott (pl. a légi alkalmassági tanúsítás kritériumrendszere), de nemzetközi környezetben (NATO, FAA, CASA, CAA, EASA irányelvek és egyéb jogforrások) számos eleme már megoldott, és rendelkezésre áll.

Az értekezés 6. fejezete a szabályozási rendszerek tervezésének általánosan elfogadott menetét, és módszertanát írja le, míg a 7. fejezet számos hagyományos (PID, LQP_PID), és modern (pólus áthelyezés, LQR, LQG, H_2 , H_{∞} , MPC) szabályozótervezési eljárást vonultat fel, és mutatja be a tervezés menetét. A tervezési feladatok megoldása során egy széles körben használt UAV (Trainer-60 'Boomerang') térbeli mozgásának modelljeit használtam, amely jól közelíti a SUAV kategóriában számos típus matematikai modelljét.

Az értekezés 8. fejezete a holtidő kérdéskörével foglalkozik, amely terület szakemberek által kevésbé vizsgált. A holtidő lényeges mértékben befolyásolja azon UAV/UAS rendszerek működését, ahol az UAVt automatikus, szervo hajtással rendelkező antenna-rendszer követi, melyre tipikusan jellemző a holtidő. A másik ok, ami hangsúlyossá teszi ezt a problémát, az emberi tevékenységek (érzékelés, döntéshozatal, beavatkozás) holtideje. Régről ismert, hogy az automatikus folyamatokban az ember sokszor *in-line* tevékenykedik, vagyis bekötött a zárt szabályozás folyamatába, így az emberi viselkedés és tevékenység modellezését sem kerülhetjük meg. Az értekezésben részletesen foglalkoztam a holtidő lineáris, Padé-approximációs közelítésének matematikai problémájával, és meghatároztam a közelítésnek azt a rendszámát, amely lehetővé teszi a holtidő igényes, pontos közelítését.

Bár érzékeny terület, de nem lehet megkerülni azt sem, hogy az irányítástechnikát segítségül hívva az UAV operátorok tevékenységét leíró matematikai modellek kritikus paramétereit (erősítés, időállandó, holtidő), amelyeket elérve, vagy azokat meghaladva, a zárt irányítási rendszerek elvesztik stabilitásukat, könnyen meghatározhatjuk.

Másik lehetséges terület, ahol ez a módszertan nagyon jól használható, az UAV operátorok alkalmasságának megállapítása. Ezen a területen jelenleg még nem áll rendelkezésre objektív mérőszám, így az értekezésben bemutatott módszer, és annak kiterjesztése bonyolultak irányítási rendszerekre jól segítheti az egészségügyi alkalmassági minimum követelmények kidolgozóját.

III. A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA, TÉZISEKET ALÁTÁMASZTÓ PUBLIKÁCIÓK

Értekezésem tudományos tézisei három évtized tudományos kutató-, fejlesztő-, és innováló munkám eredményeit mutatják be, melyek az alábbiak:

TI tézis: Módszertant dolgoztam ki reprezentatív szakmai-tudományos felmérés lebonyolítására, melynek segítségével országos, reprezentatív felmérést hajtottam végre az UAV/UAS rendszerekkel szemben támasztott elvárások, műszaki követelmények és tartalmak azonosítására. A felmérés összegzett, és kiértékelt eredményeire támaszkodva megalkottam egy merőben új UAV/UAS rendszer koncepcióját, amelyre építkezve elkezdődhet egy olyan UAS rendszer koncepcionális, és előzetes tervezése, amely úgy katonai-, mint nem katonai céllal sikeresen használható majd felderítési feladatokra, illetve a perimetrikus védelmi rendszerek új eleme is lehet.

1. Reprezentatív szakmai felmérés adatai alapján műszaki követelményrendszert alkottam meg, amely kritérium-rendszer a prototípus UAV/UAS rendszer tervezésekor jól használható [TI-1, TI-2, TI-3, TI-4, TI-5, TI-6, TI-7, TI-8].
2. Megalkottam egy multirotoros UAV-ra épülő, merőben új felfogást tükröző biztonsági rendszer új alrendszerének (*Night Watchbird UAV System*) koncepcióját, amely alkalmas nagy területen elhelyezkedő polgári-, és katonai objektumok perimetrikus védelmének segítésére, és az erők védelme hatékonyságának javítására [TI-9, TI-10, TI-11, TI-12].

Téziseket alátámasztó publikációk:

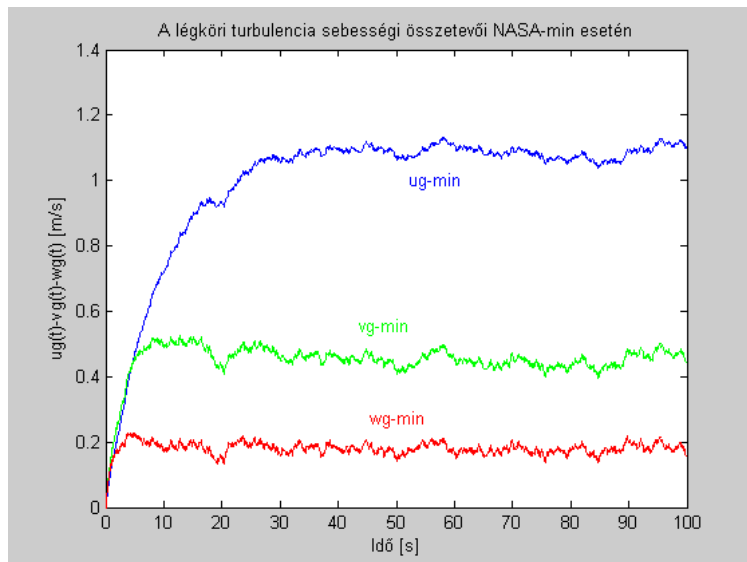
- [TI-1] Dr. Szabolcsi Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépek polgári alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata*. Műszaki tudomány az Észak-Alföldi Régióban 2007 konferencia kiadványa. MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, pp 59-65 (2007) (Elektronikus műszaki füzetek IV).
- [TI-2] Róbert Szabolcsi: *Some Thoughts on the Conceptual Design of the Unmanned Aerial Systems Used in Military Applications*. XVI. Repüléstudományi Napok Konferencia. Magyarország, 2008.11.13-2008.11.14. Budapest: BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2008. pp. 1-8. (ISBN:978-963-420-857-0).
- [TI-3] Szabolcsi Róbert: *Pilóta nélküli repülőgépekkel szemben támasztott követelmények vizsgálata - az "Alpha"-csoport*. „Műszaki Tudomány az Észak-alföldi régióban 2008” tudományos konferencia kiadványa, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, Elektronikus Műszaki Füzetek V, pp(23-33).
- [TI-4] Dr. habil. Szabolcsi Róbert: *Egy felmérés margójára - néhány gondolat a pilóta nélküli repülőgépek polgári és katonai alkalmazásáról*. Szolnoki Tudományos Közlemények, ISSN 1419-256X, 2060-3002, pp(1-12), 2008.
- [TI-5] Dr. Róbert Szabolcsi: *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle Systems Used for Military Applications*. Scientific Bulletin of "Henri Coanda" Air Force Academy, ISSN 2067-0850, 1/2009, pp(61-68), 2009.
- [TI-6] Róbert Szabolcsi: *Conceptual Design of Unmanned Aerial Vehicle Systems for Non-Military Applications*. Proceedings of the 11th Mini Conference On Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies. 800 p. Budapest, Magyarország, 2008.11.10-2008.11.12. (BME) Department of Railway Vehicles at the BME, 2010. pp. 637-644. (VSDIA 2008) (ISBN: 978 963 313 011 7).
- [TI-7] Róbert Szabolcsi: *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle for the Firefighter Applications*. 12th International Conference on Scientific Research and Education in the Air Force: CD-ROM Proceedings. Brasov, Románia, 2010.05.27-2010.05.29. Brasov: Air Force Academy "Henri Coanda", 2010. pp. 1-4. (ISBN: 978-973-8415-76-8)

- [II-8] Róbert Szabolcsi: *Conceptual Design of the Unmanned Aerial Vehicle for the Police Applications*. 12th International Conference on Scientific Research and Education in the Air Force: CD-ROM Proceedings. Brasov, Románia, 2010.05.27-2010.05.29. Brasov: Air Force Academy "Henri Coanda", 2010. pp. 1-4. (ISBN: 978-973-8415-76-8).
- [II-9] Szabolcsi, R. *Night Watchbird UAV System: quadrotor alapú vagyónvédelmi-biztonsági rendszer előzetes koncepcionális-, és koncepcionális tervezése*. Hadmérnök, 1/2015, X. évf., pp(35-48).
- [II-10] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Night Watchbird UAV System: An Effective Tool Improving Force Protection Capabilities in the War Theatres*. Proceedings of the 17th International Conference "Scientific Research and Education in the Air Force" - AFASES 2015. 20th "Henri Coanda" Air Force Academy Anniversary: 1995-2015, pp(1-8).
- [II-11] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *The Quadrotor-Based Night Watchbird UAV System Used in the Force Protection Tasks*. Knowledge Based Organization Proceedings, 1/2015, pp(101-107), 2015.
- [II-12] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *The Quadrotor-Based Night Watchbird UAV System Used in the Force Protection Tasks*. The Complex Physiognomy of the International Security Environments, pp(201-216).

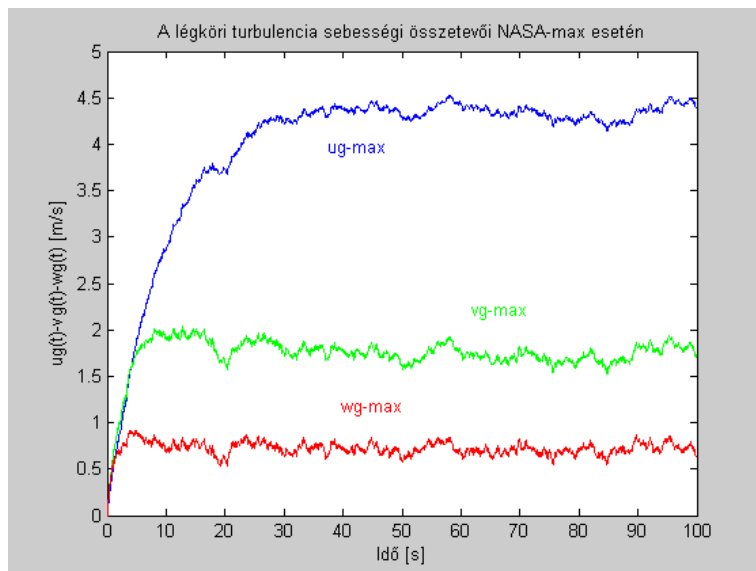
TII tézis: A légköri turbulencia egyes sebességi összetevőinek különféle kezdeti feltételek mellett történő előállítására lineáris szűrőt terveztem, melynek segítségével fehér zajból, az egyes időjárási feltételeknek megfelelő (3., 4., és 5. ábra), és az UAV test-koordináta rendszerének tengelyeire eső véletlen szélességi vektorok idősorai számítógépes modellezés során könnyen előállíthatóak [TII-1, TII-2, TII-3, TII-4, TII-5, TII-6].

Téziseket alátámasztó publikációk:

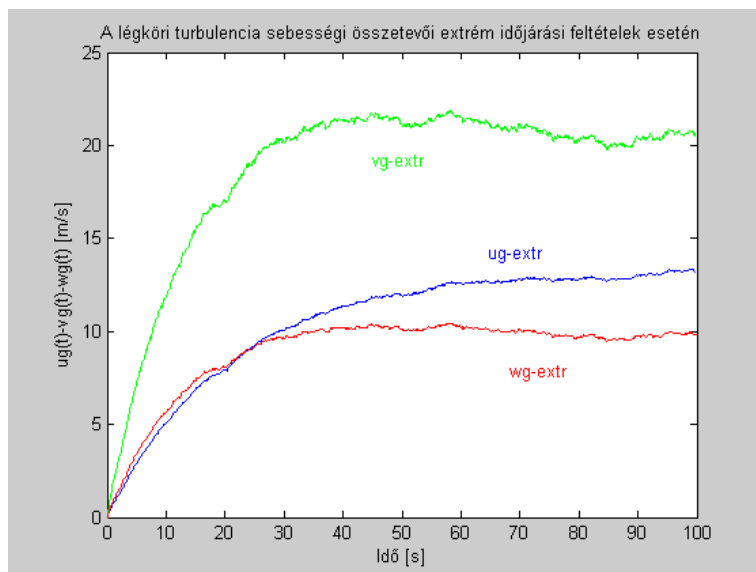
- [TII-1] Dr. habil. Szabolcsi Róbert: *Mathematical Models for Gust Modeling Applied in Automatic Flight Control Systems' Design*. New challenges in the field of military sciences 2007: International Scientific Conference CD-ROM Proceedings, 2. Electrical engineering and aviation. Budapest, Magyarország, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, pp(95-118), 2007.
- [TII-2] Dr. habil. Szabolcsi Róbert: *Légköri turbulencia modellek és azok alkalmazása az automatikus repülészabályozás területén*. Szolnoki Tudományos Közlemények XI, 23/1, pp(1-15), 2007.
- [TII-3] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Stochastic Noises Affecting Dynamic Performances of the Automatic Flight Control Systems*. Review of the Air Force Academy, 1/2009, pp(23-30), 2009.
- [TII-4] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Stochastic Noises Affecting Dynamic Performances of the Automatic Flight Control Systems*. Proc. of the 11th International Conference "Research and Education in the Air Force AFASES 2009", Brasov, Romania, pp(1182-1192), 2009.
- [TII-5] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Numerical Analysis of the Low-Altitude Air Turbulence Mathematical Models Used in Modelling of the Spatial Motion of the Small Unmanned Aerial Vehicles*. Knowledge Based Organization Proceedings, Vol3, pp(120-130), 2017.
- [TII-6] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Numerical Analysis of the Low Altitude Air Turbulence Mathematical Models Used in Modelling of the Spatial Motion of the Small Unmanned Aerial Vehicles*. The 23rd International Conference: The Knowledge-Based Organization: Conference Proceedings 3: Applied Technical Sciences and Advanced Military Technologies, pp(120-130), 2017.



3. ábra. A léggöri turbulencia sebességi összetevői NASA-min időjárási feltételek esetén.



4. ábra. A léggöri turbulencia sebességi összetevői NASA-max időjárási feltételek esetén.



5. ábra. A léggöri turbulencia sebességi összetevői NASA-extrém időjárási feltételek esetén.

TIII tézis: UAV aeroelasztikus mozgásának modellezése során bebizonyítottam, hogy:

- 1) a rugalmas deformációk matematikai modellje hozzáadódik a merev légi jármű (UAV) térbeli mozgásának matematikai modelljéhez, más szóval az aeroelasztikus UAV modellek, mint additív paraméterbizonytalanságok viselkednek [TIII-2, TIII-4, TIII-5, TIII-7, TIII-8, TIII-9];
- 2) az UAV törzsének lengésképe kiemelkedő fontosságú a fedélzeti érzékelők, mint például a szögsebesség-érzékelők, és a gyorsulásmérők beépítési helyének meghatározása során [TIII-4, TIII-9].
- 3) az aeroelasztikus légi járművek valós mozgásdinamikája jól használható a légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei dinamikus szabályozóinak számítógépes tervezése során [TIII-1, TIII-3, TIII-6].
- 4) az UAV térbeli mozgásának identifikálása során elengedhetetlenül szükséges az a matematikai rendszermodell, amelynek formájában keressük az identifikálandó rendszermodellt, melyre több alakot is javasoltam, mint például az állapotterezes rendszermodell, vagy az átviteli függvény úgy zavarásmentes, mint zajos alakban [TIII-4, TIII-9].

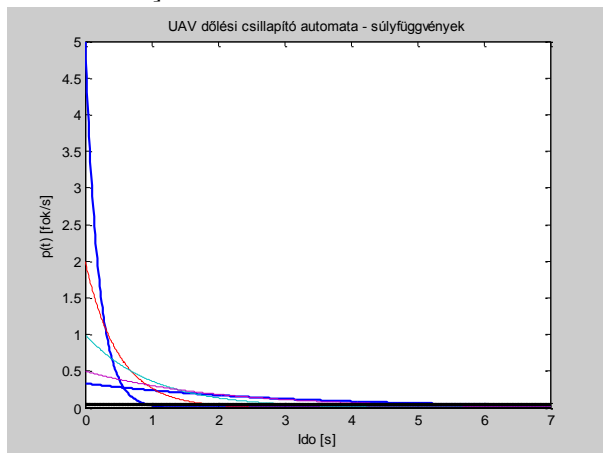
Téziseket alátámasztó publikációk:

- [TIII-1] Róbert Szabolcsi: *Design of the Pitch Attitude Control System for the Aeroelastic Fighter Aircraft*. Bulletins For Applied Mathematics BAM-1240/'96, LXXX, pp(29-40), 1996.
- [TIII-2] Szabolcsi, Róbert: *Robust Analysis of the Automatic Control Systems*. Proceedings of the International Conference on Military Technologies ICMT'07, Brno, Csehország, University of Defence, pp(447-454), 2007.
- [TIII-3] Szabolcsi, Róbert: *Robust Analysis of the Stability Augmentation System*. Proceedings of the International Conference on Military Technologies: ICMT'07, Brno, Csehország: University of Defence, pp(455-463), 2007.
- [TIII-4] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek*. Budapest, Magyarország, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, p415, 2011.
- [TIII-5] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Analysis of the Robustness of the Automatic Control Systems*. Proc. of the The 15th International Conference of Scientific Papers "Scientific Research and Education in the Air Force AFASES 2013" Brasov, Romania: Air Force Academy "Henri Coanda", pp(700-707), 2013.
- [TIII-6] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Analysis of Robustness of the UAV Stability Augmentation System*. Proc. of the The 15th International Conference of Scientific Papers "Scientific Research and Education in the Air Force AFASES 2013" Brasov, Romania. Air Force Academy "Henri Coanda", pp(708-715), 2013.
- [TIII-7] Prof, Dr. Szabolcsi Róbert: *Légi járművek aeroelasztikus lengései*. Hadmérnök 8: 2, pp(87-97), 2013.
- [TIII-8] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *UAV elasztikus mozgásának modellezése*. Hadmérnök8:, 2, pp(66-86), 2013.
- [TIII-9] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Légi robotok automatikus repülésszabályozása*. Budapest, Magyarország, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, p478, 2016.

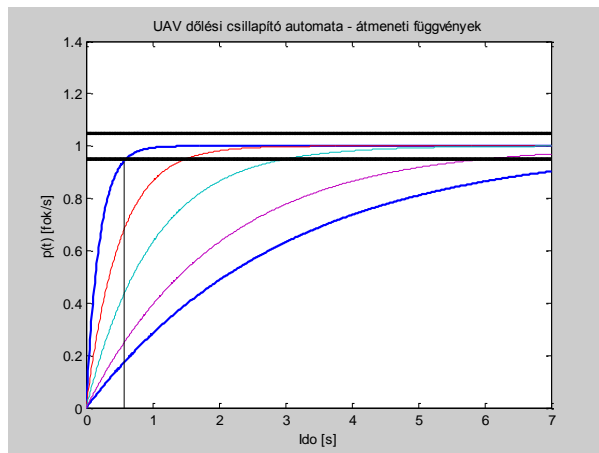
TIV tézis: Bebizonyítottam, hogy az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi alkalmasságának tanúsítása egyaránt szolgálja úgy a tervezők, a gyártók, mint az üzemeltetők érdekeit is, és lényeges mértékben javítja az UAV/UAS rendszerek repülésbiztonságát [TIV-1]:

1. az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi alkalmassági tanúsításához elengedhetetlenül szükséges általános követelményrendszert dolgoztam ki: alapvető fogalmakat és definíciókat vezettem be az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi alkalmasságának mérésére, valamint azonosítottam az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi alkalmasságának tanúsításához szükséges repülési paraméterek jellemzőit [TIV-2, TIV-3, TIV-4, TIV-5, TIV-6, TIV-9, TIV-12];

2. az UAV/UAS rendszerek fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszere típus-, és légiakalmassági vizsgálatához követelményrendszert dolgoztam ki, amely lehetővé teszi az UAV hosszirányú, és az oldalirányú irányítási csatornáinak vizsgálatát, és megfelelési tanúsítását. A számítógépes szimulációkhoz megfelelő MATLAB környezetet alakítottam ki [TIV-7, TIV-8, TIV-10, TIV-11].

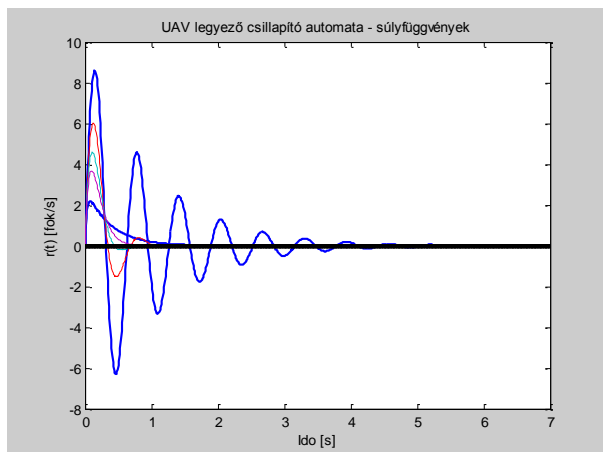


UAV dőlési csillapító automata súlyfüggvényei.
 $T_{Rmin} = 0,2s; T_{Rmax} = 3s; T_R = 0,5s; T_R = 1s; T_R = 2s$

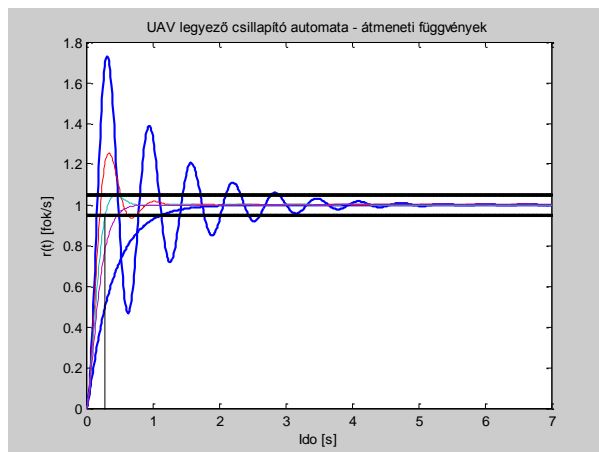


UAV dőlési csillapító automata átmeneti függvényei.
 $T_{Rmin} = 0,2s; T_{Rmax} = 3s; T_R = 0,5s; T_R = 1s; T_R = 2s$

6. ábra.

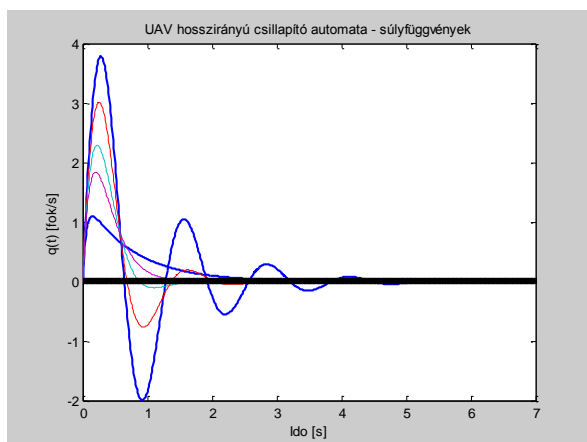


UAV legyező csillapító automata súlyfüggvényei
 $\xi_{clmax} = 2; \xi_{clmin} = 0,1; \xi_{cl} = 0,4; \xi_{cl} = 0,7; \xi_{clkrit} = 1$

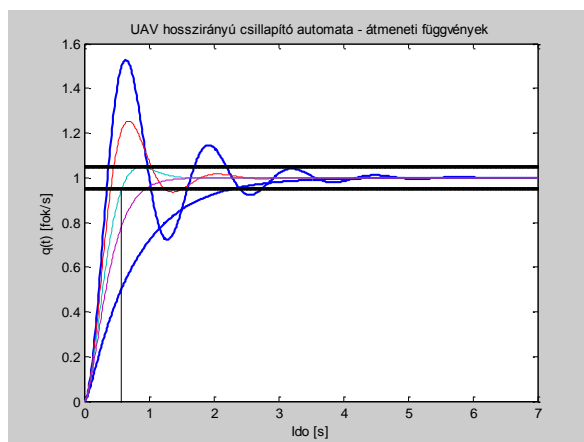


UAV legyező csillapító automata átmeneti függvényei
 $\xi_{clmax} = 2; \xi_{clmin} = 0,1; \xi_{cl} = 0,4; \xi_{cl} = 0,7; \xi_{clkrit} = 1$

7. ábra.



UAV bólintó csillapító automata súlyfüggvényei.
 $T_{Rmin} = 0,2s; T_{Rmax} = 3s; T_R = 0,5s; T_R = 1s; T_R = 2s$



UAV bólintó csillapító automata átmeneti függvényei.
 $T_{Rmin} = 0,2s; T_{Rmax} = 3s; T_R = 0,5s; T_R = 1s; T_R = 2s$

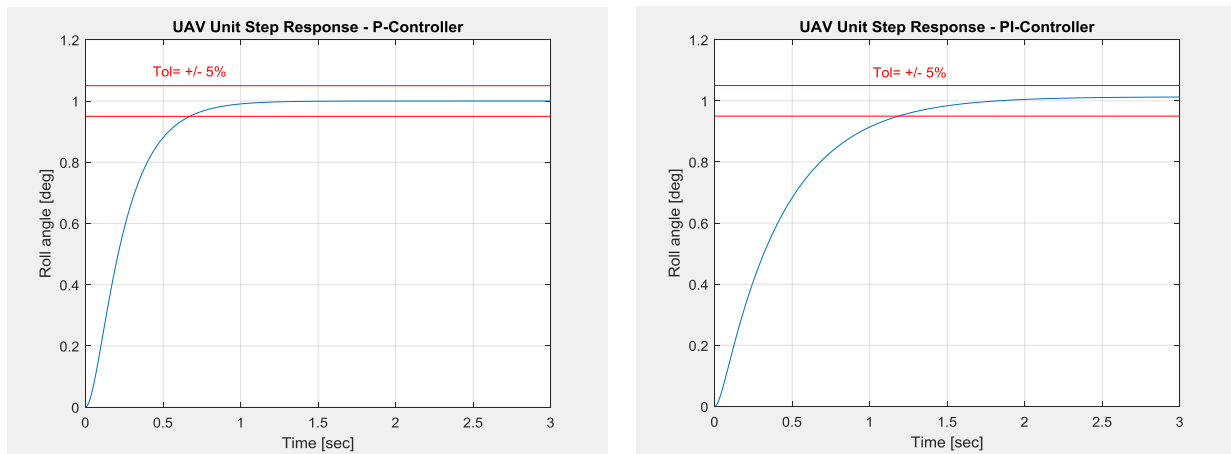
8. ábra.

Téziseket alátámasztó publikációk:

- [TIV-1] Szabolcsi R.: *UAV és UAS rendszerek légialkalmassági tanúsítása: barát vagy ellenség?!* Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2013 tudományos konferencia kiadványa. Elektronikus műszaki füzetek XIII, ISBN 978-963-7064-30-2, pp(1-10), MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, 2013.
- [TIV-2] Szabolcsi, R. *Pilóta nélküli légi jármű rendszerek légialkalmassági jellemzői, és a légialkalmassági tanúsítás követelményei.* Szolnoki Tudományos Közlemények, XII. évf., 1. szám, ISSN 1419-256X (2060-3002), pp (64-75), 2013.
- [TIV-3] Szabolcsi, R. *TUAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus-, és légialkalmassági tanúsítása.* Hadmérnök, 2013/4. szám, p(26-32).
- [TIV-4] Szabolcsi, R. *A New Concept of the Basic Terms and Definitions for Measuring the UAV and UAS Systems Compliance with Airworthiness Criteria.* Bolyai Szemle, ISSN 1416-1443, 1/2014, XXIII. évf., pp(5-18), 2014.
- [TIV-5] Szabolcsi, R. *A New Concept of the Unmanned Aerial Vehicles Flying and Handling Qualities.* Bolyai Szemle, ISSN 1416-1443, 1/2014, XXIII. évf., pp(19-26), 2014.
- [TIV-6] Szabolcsi, R. *Pilóta nélküli légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai.* Hadtudomány, ISSN 1215-4121, 1/2014., XXIV. évf., E-szám, pp(90-104), 2014.
- [TIV-7] Szabolcsi, R. *UAV Longitudinal Motion Flying Qualities Applied in Airworthiness Certification Procedure.* Land Forces Academy Review, ISSN 2247-840X, eISSN 1582-6384, 2/2014(74), pp(208-216), 2014.
- [TIV-8] Szabolcsi, R. *UAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai - hosszirányú mozgás.* Hadmérnök, ISSN 1788-1919, 2/2014, IX. évf., pp(149-157), 2014.
- [TIV-9] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *A New Approach of Certification of the Airworthiness of the UAV Automatic Flight Control System.* Land Forces Academy Review, 4/2014: Vol76, pp(423-431), 2014.
- [TIV-10] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *UAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai - oldalirányú mozgás.* Bolyai Szemle XXIII: Vol2, pp(85-97), 2014.
- [TIV-11] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Lateral/Directional Flying Qualities Applied in UAV Airworthiness Certification Process.* Land Forces Academy Review, 3/2014: Vol75, pp(336-346), 2014.
- [TIV-12] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert: *Newest Provisions in Regulations Applied for Small Unmanned Aircraft Systems.* Review of the Air Force Academy, No1(28)2015, pp(7-12), 2015.

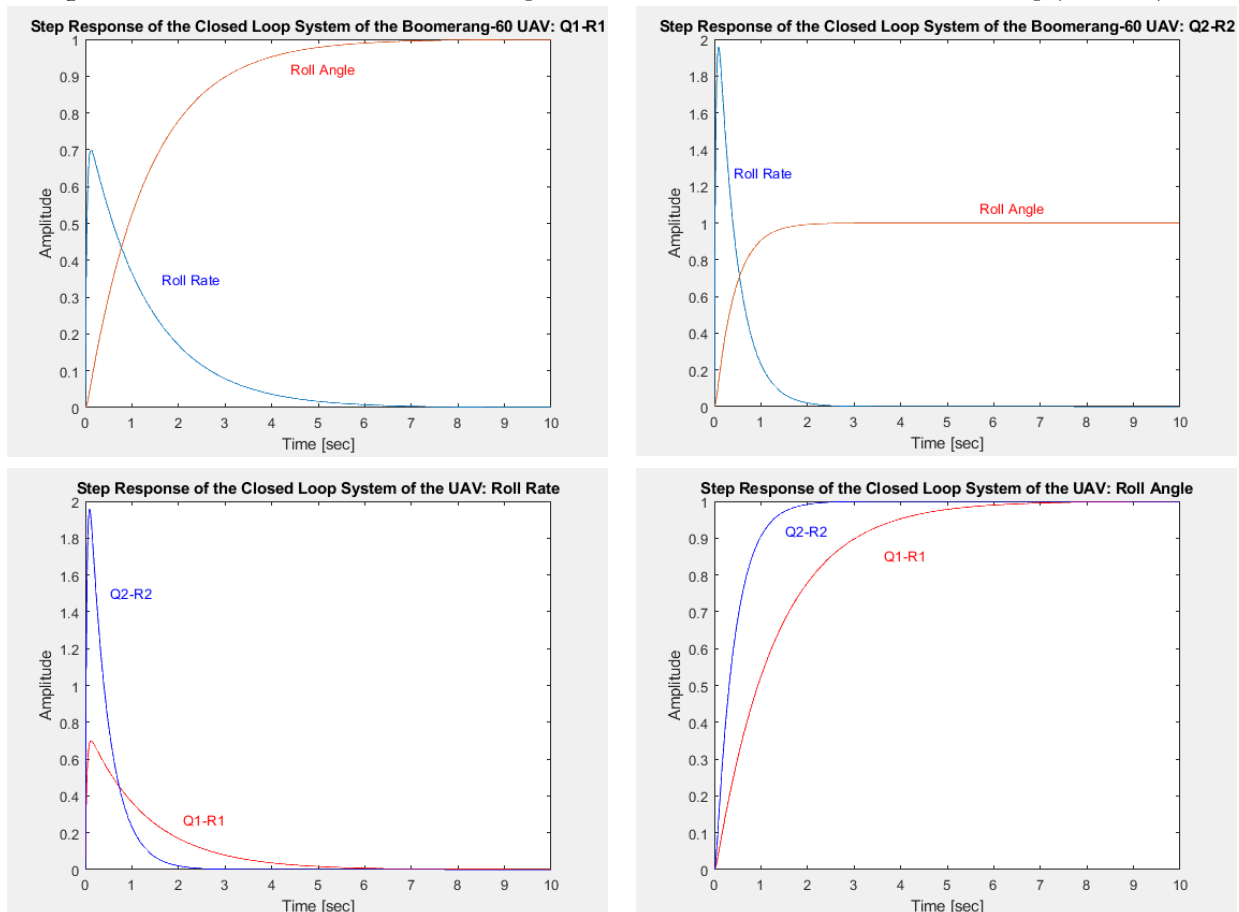
TV tézis: Szakirodalmi kutatásokra alapozva megállapítottam, hogy az UAVk automatikus repülésszabályozó (robotpilóta) rendszereinek tervezése során széles körben használatosak a modern számítógépes tervező rendszerek, amelyek lényegesen lerövidítik egy-egy UAV prototípusának fejlesztési idejét, csökkentik a költségeket, és javítják a hatékonyságot [TV-1, TV-3, TV-4, TV-11, TV-12]:

1. optimális PID-szabályozót terveztem, illetve a pólus allokáció elvére épülő szabályozótervezést hajtottam végre a "Trainer-60" SUAV identifikált modelljein [TV-2, TV-5] (9. ábra).



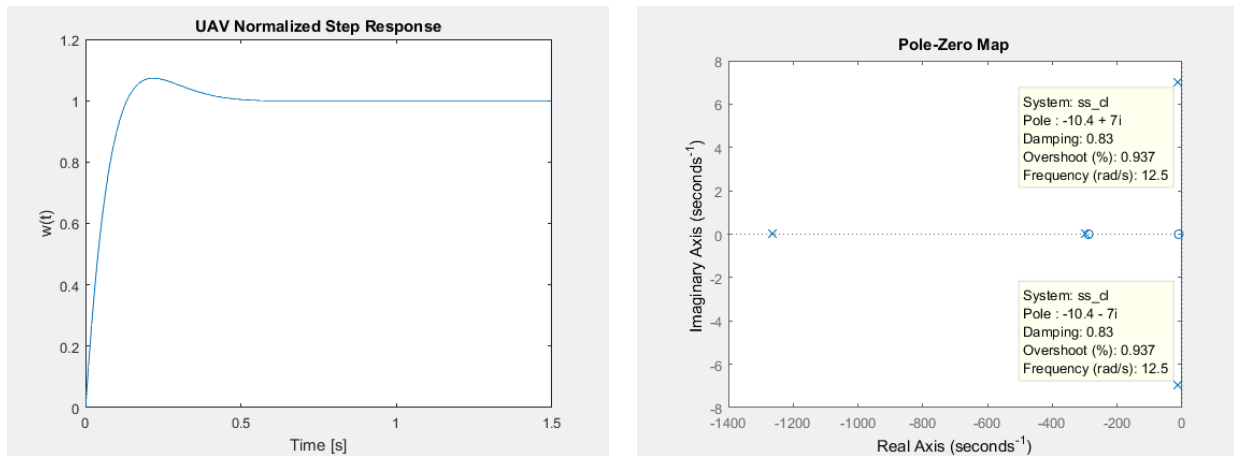
9. ábra. SUAV dőlési szög stabilizáló rendszer átmeneti függvényei.

2. az LQR tervezési módszer segítségével optimális szabályozót terveztem a 'Trainer-60' SUAV részére. Igazoltam a módszer alkalmazhatóságát, bebizonyítottam a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásának korlátait is [TV-6, TV-7, TV-8, TV-9, TV-10, TV-13] (10. ábra).



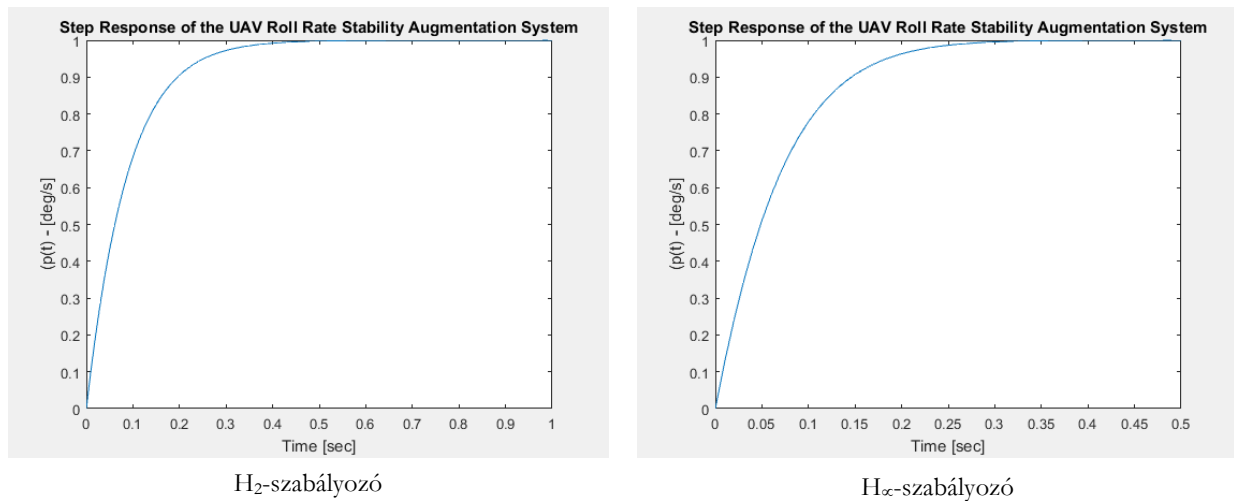
10. ábra. SUAV dőlési szög stabilizáló rendszer átmeneti függvényei.

3. a hagyományos, egyszerű LQG tervezési módszer segítségével optimális szabályozót terveztem a „Trainer-60” SUAV részére. Bebizonyítottam, hogy az LQG módszer jól alkalmazható a sztochasztikus külső zavarások és belső zajok jelenléte mellett, igazoltam a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásának korlátait is [TV-12, TV-13, TV-14] (11. ábra).



11. ábra. SUAV függőleges repülési sebesség stabilizáló rendszer átmeneti függvénye (balra), és a zárt szabályozás pólusai és zérusai (jobbra)

4. elvégeztem a „Trainer-60” SUAV robotpilótájának előzetes tervezését a H_2 és H_∞ kritérium szerint is. Igazoltam e módszerek alkalmazhatóságát, és bebizonyítottam az egyes módszerek alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásuk korlátait is. Megállapítottam, hogy az alkalmazott tervezési eljárások segítségével a zárt szabályozási rendszerek előírt minőségi jellemzői biztosíthatóak. A zárt repülésszabályozó rendszerek robusztuságának vizsgálatára a zárt rendszerek $S(s)$ és a $T(s)$ eredő átviteli függvényeit használtam [TV-15, TV-16] (12. ábra).

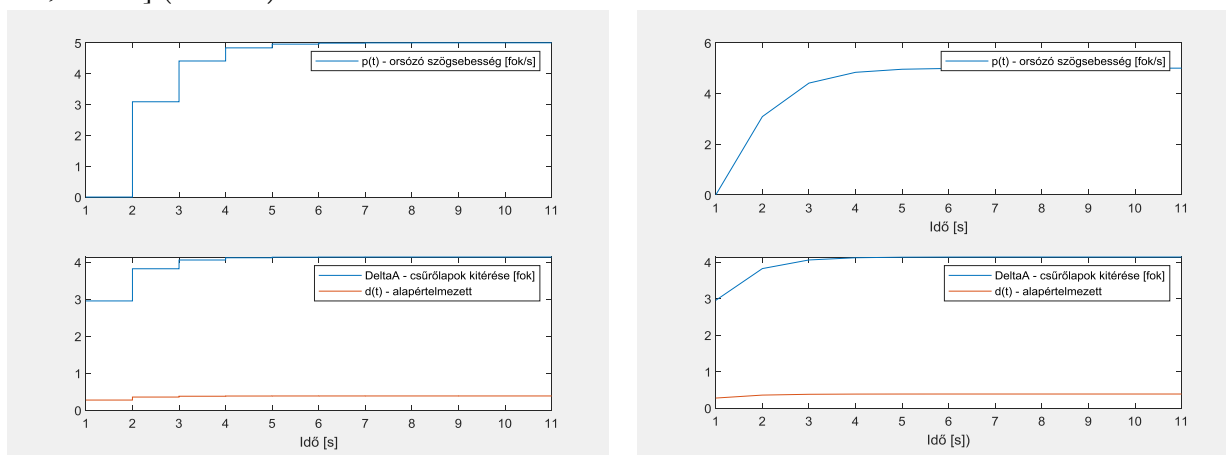


H_2 -szabályozó

H_∞ -szabályozó

12. ábra. SUAV dőlési szögsebesség átmeneti függvényei.

5. csúszóhorizontú MPC szabályozások elméleti háttérét foglaltam össze, és igazoltam, hogy a módszer jól használható UAVk robotpilótáinak tervezése során, amikor is a lekövetendő referencia jel jól mintázza a tipikus UAV repülési helyzeteket akár normál, akár veszélyes repülési helyzetekben is [TV-17, TV-18] (13. ábra).



Lépcsős nyomtatási opció

Alapértelmezett nyomtatási opció

13. ábra. SUAV dőlési csillapító automata MPC irányítása.

6. A szabályozók tervezéséhez saját MATLAB függvénykönyvtárat hoztam létre, amely magába foglalja úgy a rendszertervezést, mint a megtervezett zárt szabályozási rendszer stabilitásvizsgálatát, valamint a szűkebb értelemben vett minőségi jellemzők (pl. tranziens idő, túlszabályozás, erősítési tartalék, fázistartalék) számítását is [TV-2, TV-5, TV-6, TV-7, TV-8, TV-9, TV-10, TV-13, TV-14, TV-15, TV-16].

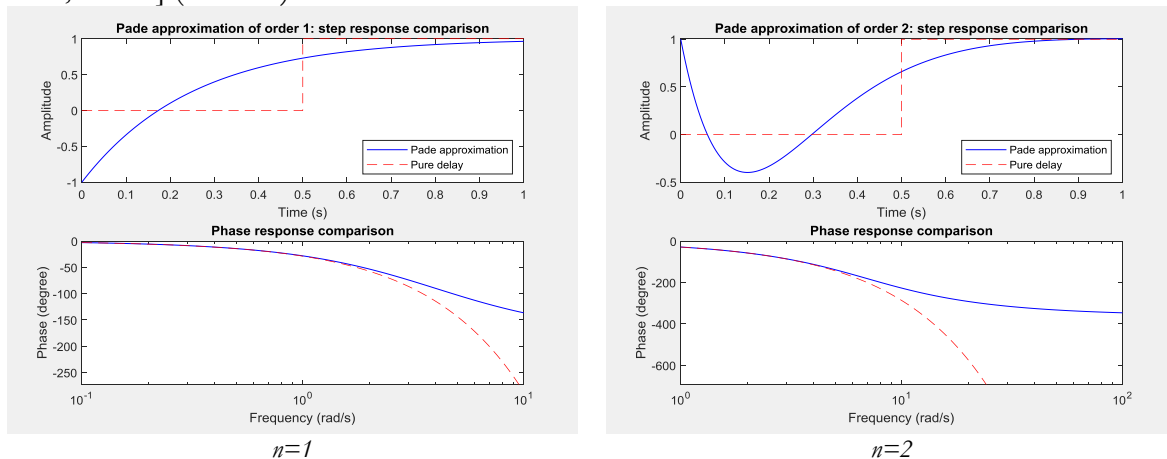
Téziseket alátámasztó publikációk:

- [TV-1] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (szerk.): *Légi robotok automatikus repülésszabályozása*. Budapest: Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 2016. 478 p. ISBN: 978-615-5460-23-4.
- [TV-2] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Optimal PID Controller Based Autopilot Design and System Modelling for Small Unmanned Aerial Vehicle*. Review of the Air Force Academy, No.3 (38)/2018, pp(43-58).
- [TV-3] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (szerk.): *Korszerű szabályozási rendszerek számítógépes tervezése*. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 415 p. ISBN: 978-615-5057-26-7, 2011.
- [TV-4] Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (szerk.): *Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek*. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2011. 415 p. ISBN: 978-963-7060-32-8.
- [TV-5] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Pole Placement Technique Applied in Unmanned Aerial Vehicles Automatic Flight Control System Design*. Land Forces Academy Review 1(89)/2018: pp. 88-98. (2018).
- [TV-6] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Design and Development of the LQR Optimal Controller for the Unmanned Aerial Vehicle*. Review of the Air Force Academy, ISSN 1842-9238, eISSN 2069-4733, 1:(36/2018), pp. 45-54. (2018).
- [TV-7] R. Szabolcsi: *Solution of the Flight Path Tracking Problems in UAV Automatic Flight Control Systems*. Proc. of the 19th International Conference “The Knowledge-based Organization” KBO 2011, Conference Proceedings3: Session ‘Applied technical Sciences and Advanced Military Technology’, pp(385-395).
- [TV-8] R. Szabolcsi: *LQ-Based Algorithms Applied in Solution of the UAV Flight Path Tracking Problems*. Proc. of the 19th International Conference “The Knowledge-based Organization” KBO 2011, Conference Proceedings3: Session ‘Applied technical Sciences and Advanced Military Technology’, pp(396-402).

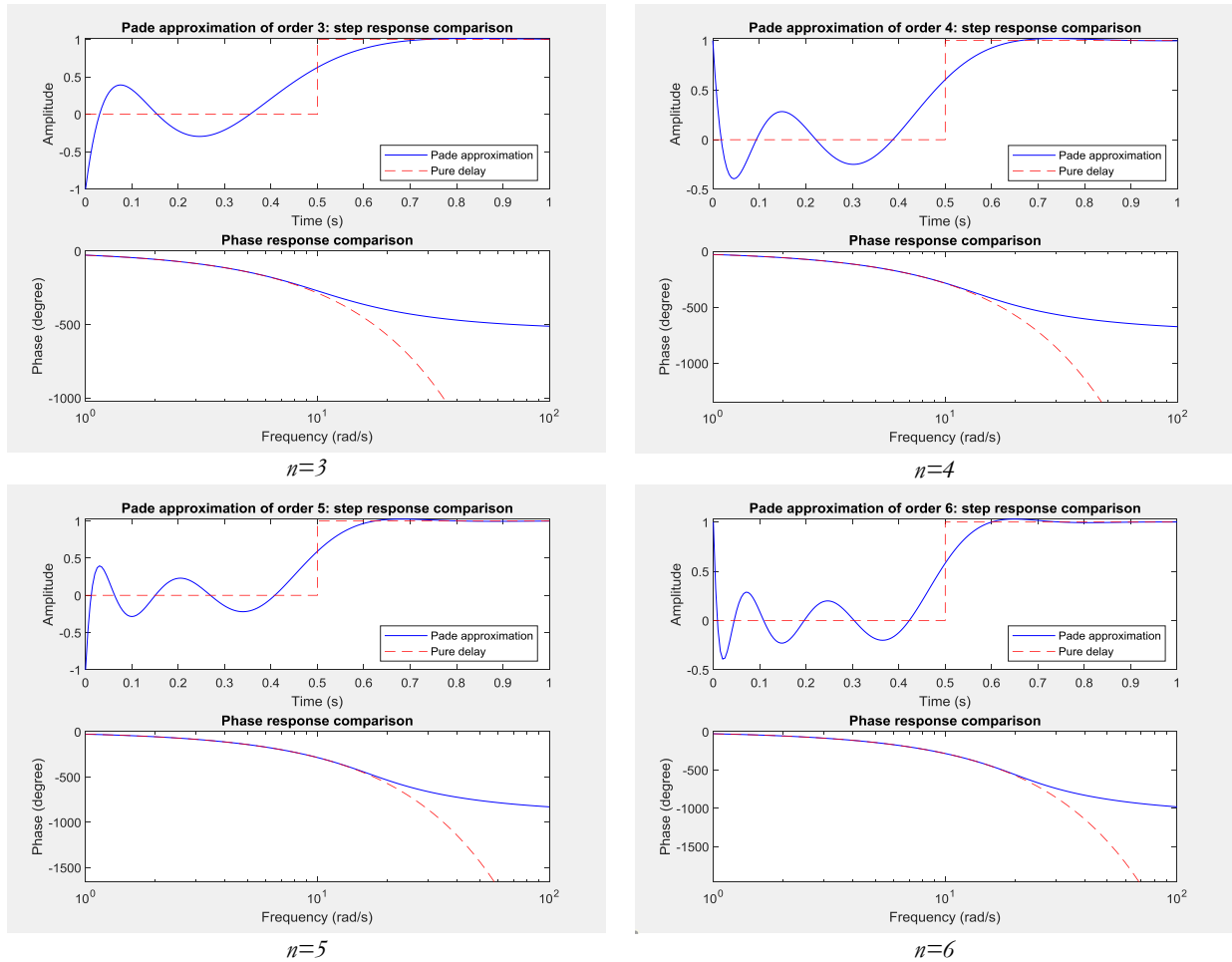
- [TV-9] R. Szabolcsi: *LQ-Based Preliminary Design of the Multirotor UAV Automatic Flight Control System*. Proc. of the 17th International Conference “The Knowledge-based Organization” KBO 2011, Session ‘Applied technical Sciences and Advanced Military Technology’, pp(187-197).
- [TV-10] R. Szabolcsi: *UAV Controller Synthesis Using LQ-Based Design Methods*. The International Conference of Scientific Papers, 1/2011, pp(1252-1254).
- [TV-11] Szabolcsi Róbert: *Pilótánélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének előzetes méretezése*. Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL) (ISSN: 1417-0604) (eISSN: 1789-770X) XVII:(38/2) pp 1-15. (2005)
- [TV-12] Szabolcsi Róbert: *Robust Controller Sythesis for the Aircraft Pitch Attitude Control System*. Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL) (ISSN: 1417-0604) (eISSN: 1789-770X) XII:(29/1) pp. 79-88. (2000).
- [TV-13] R. Szabolcsi: *Aircraft Flight Control Systems’ Optimization Using LQR and LQG Methods*. Proc. of the 5th Minin Conference on Vehicle Systems Dynamics, Identification and Anomalies, pp(435-444), 1996.
- [TV-14] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Robust LQG Controller Design for the Small Unmanned Aerial Vehicle*. Review of the Air Force Academy, ISSN 1842-9238, eISSN 2069-4733, 1:(36/2018) pp. 31-38. (2018).
- [TV-15] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Robust Control System Design for Small UAV Using H₂-optimization*. Land Forces Academy Review (ISSN: 2247-840X) (eISSN: 1582-6384) 2/2018: (90/2018) pp. 151-159. (2018).
- [TV-16] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Robust H_∞ Optimal Controller Design for the Small Unmanned Aerial Vehicle*. Land Forces Academy Review, 4 (92)/2018, pp(313-322)
- [TV-17] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Model Predictive Control Applied in UAV Flight Path Tracking Missions*. Review of the Air Force Academy, Vol. XVII, No.1 (39)/2019, pp(49-62), 2019.
- [TV-18] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Kisméretű UAV modell prediktív alapú irányítása*. Repüléstudományi Közlemények, eISSN 1789-770X, 1/2019, pp(125-139), 2019.

TVI tézis: Szakirodalmi kutatások alapján megállapítottam, hogy a holtidő matematikai modellezése elengedhetetlen, főleg erre érzékeny irányítási rendszerekben. A holtidő lineáris közelítésére a Padé-approximáció módszerét alkalmaztam.

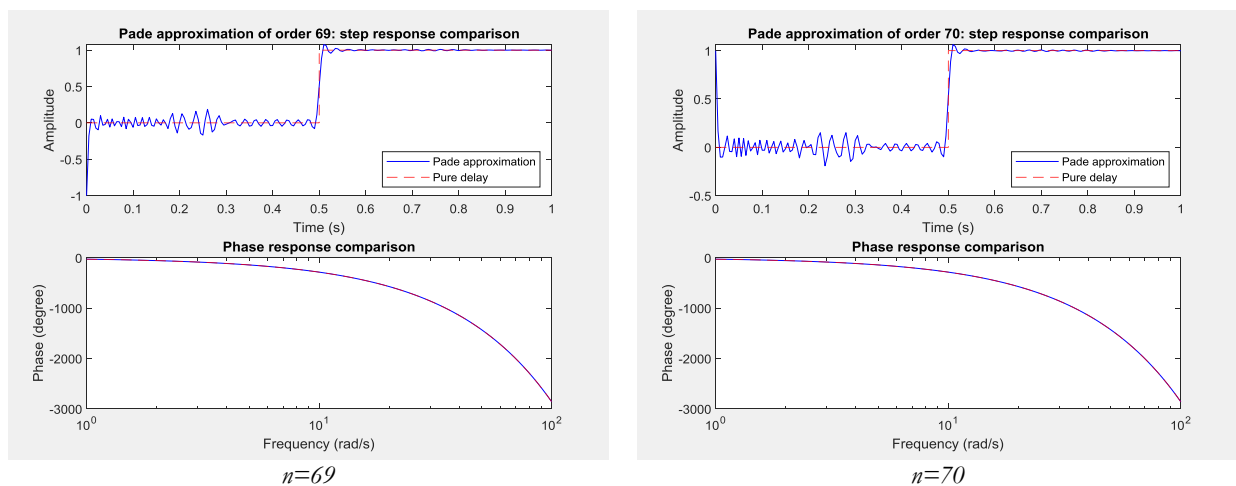
- számításokkal és számítógépes szimulációkkal bebizonyítottam, hogy megfelelő pontosságú (2% hiba) közelítés $n=5$, és ettől magasabb rendszámok esetén várható (14. ábra). A közelítés felső rendszáma $n=69$, amikor még nem lehet fel instabilitás a közelítő holtidős modellek viselkedésében [TVI-4, TVI-5, TVI-6] (15. ábra).



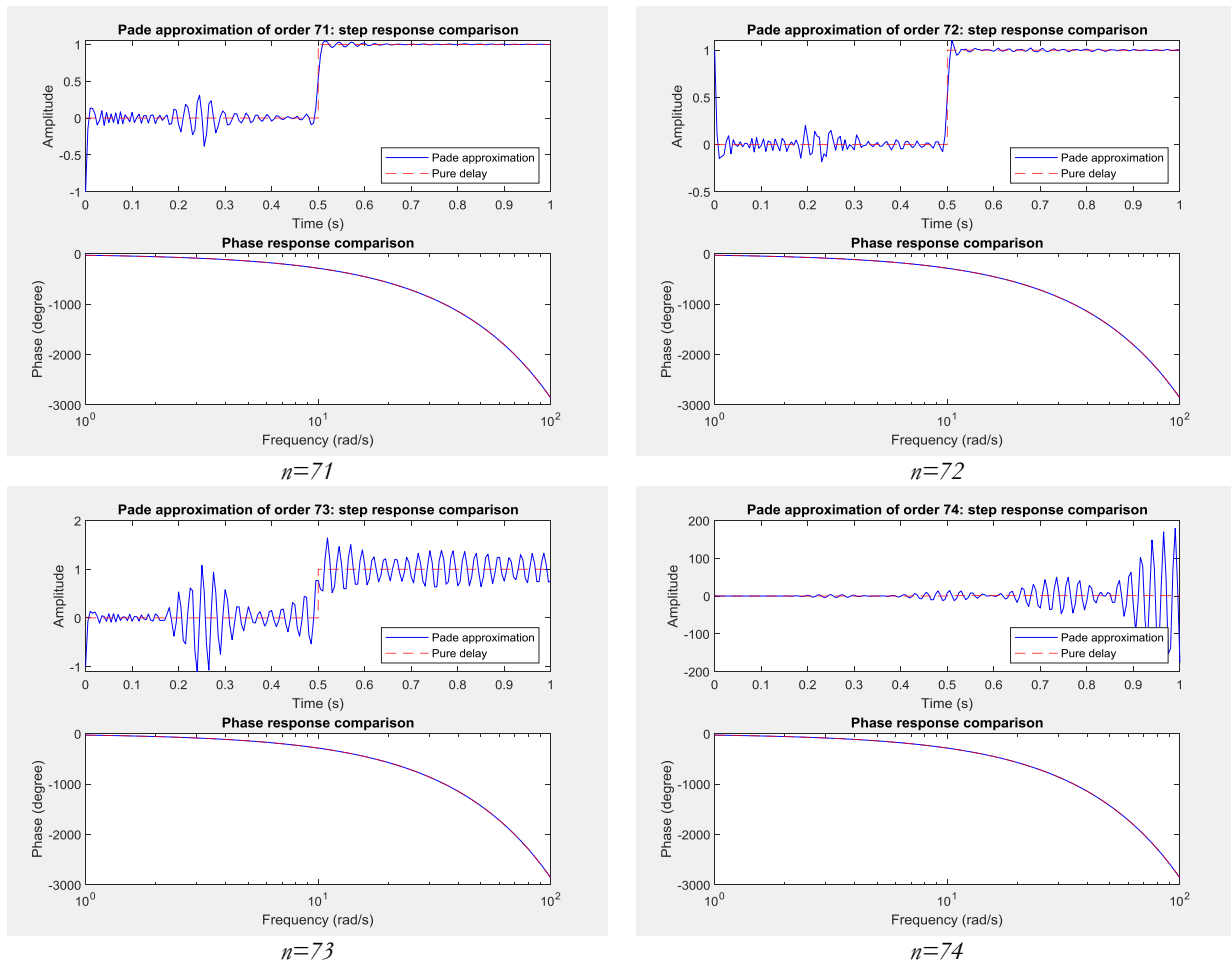
14. ábra. Holtidő Padé-approximációs közelítése.



14. ábra. Holtidő Padé-approximációs közelítése.

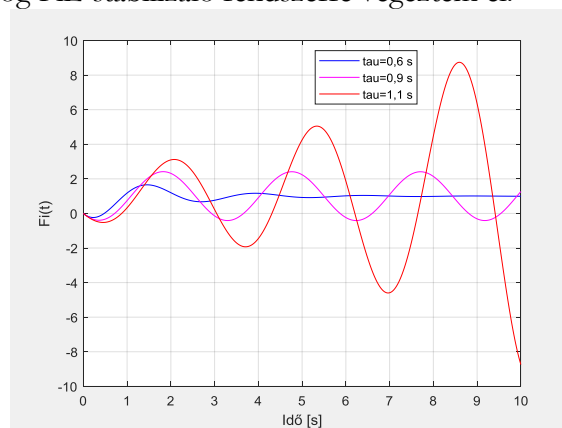


15. ábra. Holtidő Padé-approximációs közelítése.

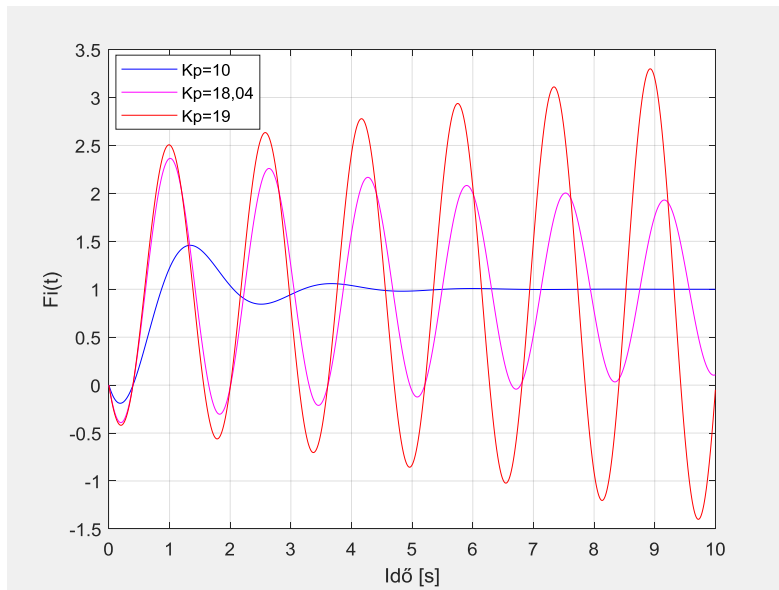


15. ábra. Holtidő Padé-approximációs közelítése.

- szakirodalmi kutatások és saját tudományos kutatómunkám eredményeként megállapítottam, hogy az UAV kezelők (operátorok) tevékenységének modellezésére számos modell ismert, és alkalmazott. Elvégeztem az egyes matematikai modellek vizsgálatát, meghatároztam a rendszermodellek jellemzőit, amelyek befolyásolják a zárt szabályozási rendszerek stabilitását [TVI-1, TVI-2, TVI-3].
- Az UAV kezelők PD-TD modelljét alapul véve, meghatároztam az UAV operátor τ holtidejének, a K_p erősítésének, és a T_p predikciós időállandójának kritikus értékeit, amelyek destabilizálják a zárt UAV PiL szabályozási rendszer viselkedését [TVI-1, TVI-2, TVI-7, TVI-8] (16., 17., 18. ábra). Vizsgálataimat a dőlési szög PiL-stabilizáló rendszerre végeztem el.

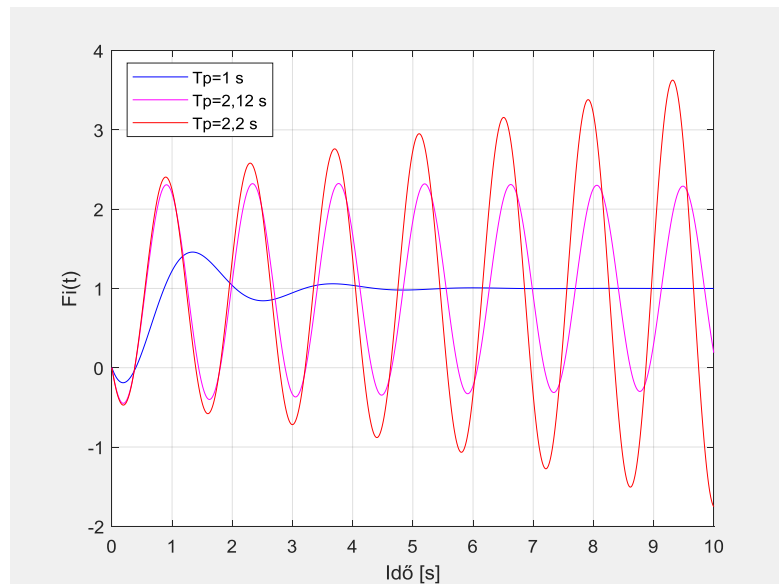


16. ábra. PiL-szabályozás viselkedése időtartományban (holtidő hatása)



17. ábra: PiL-szabályozás viselkedése időtartományban.

"—" $K_{p_{szb}} = 10$ "... " $K_{p_{krit}} = 18,04$ "-.-.-" $K_{p_{nszb}} = 19$



18. ábra: PiL-szabályozás viselkedése időtartományban.

"—" $T_{p_{szb}} = 1 s$ "... " $T_{p_{krit}} = 2,12 s$ "-.-.-" $T_{p_{nszb}} = 2,2 s$

4. A matematikai és az irányításelméleti feladatok megoldására saját MATLAB függvénykönyvtárát hoztam létre [TVI-1, TVI-2, TVI-3, TVI-4, TVI-5, TVI-6, TVI-7, TVI-8].

Téziseket alátámasztó publikációk:

[TVI-1] Szabolcsi Róbert: *A repülőgép-vezető repülésbiztonság szempontjából kritikus paramétereinek meghatározása.* Debreceni Műszaki Közlemények, ISSN 1785-0622, 3/2006, pp(13-24), 2006.

[TVI-2] Dr. habil. Szabolcsi Róbert: *A repülőgép-vezető kritikus paramétereinek komplex vizsgálata az oldalirányú irányítási csatornában.* Repüléstudományi Közlemények (1997-től) (1417-0604 1789-770X): XVIII 38/1. pp 97-117 (2006).

- [TVI-3] Dr. habil Szabolcsi Róbert: *A repülőgép-vezető hagyományos és modern matematikai modellezése a repülőgépek irányítási rendszerében*. Repüléstudományi Közlemények (1997-től) (1417-0604 1789-770X): XVIII 38/2 pp 1-18 (2006).
- [TVI-4] Dr. Szabolcsi Róbert: *Holtidős tagok közelítése Padé-sorokkal*. Repüléstudományi Közlemények (1997-től) (1417-0604 1789-770X): 2007 1 pp 110-129 (2007).
- [TVI-5] Dr. habil Szabolcsi Róbert: *Modeling of the Human Pilot time delay Using Padé Series*. Academic and Applied Research in Military Science (1588-8789 1788-0017): 6 3 pp 405-428 (2007).
- [TVI-6] Dr. habil Szabolcsi Róbert: *Handling Time Delay in Control of Unmanned Robots*. Bolyai Szemle (1416-1443): XVII 4 pp 47-60 (2008).
- [TVI-7] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Pilot-in-the-Loop Problem and its Solution*. Review of the Air Force Academy (1842-9238 2069-4733): 1/2009 pp 12-22 (2009) (Selected Paper of the 11th International Conference "Research and Education in the Air Force" AFASES 2009).
- [TVI-8] Prof. Dr. Róbert Szabolcsi: *Pilot-in-the-Loop Problem and its Solution*. Proc. of the 11th International Conference "Research and Education in the Air Force" - AFASES 2009, Brasov, Romania, pp(1169-1181), 2009.