

# VÁLASZ

## Dr. Bauer Péter tudományos főmunkatárs úr bírálatában megfogalmazott kérdésekre és észrevételekre

a

### „Állami célú, kisméretű pilóta nélküli légi jármű rendszerek koncepcionális-, és számítógéppel támogatott előzetes tervezése és vizsgálata”

#### című MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezés vonatkozásában

Először is, szeretném megköszönni Dr. Bauer Péter tudományos főmunkatárs úrnak az alapos, minden részletre kiterjedő opponensi munkáját, és az opponenciájában feltett kérdéseket és észrevételeket, amelyekre az alábbiakban foglaltak szerint szeretnék válaszolni.

#### I.

Az értekezés alap gondolata már a 2018-2019 években megfogalmazódott, amikor is az UAV/UAS rendszerek tervezése, gyártása és állami célú alkalmazása (katonai-, rendőri-, határőrizeti- stb.) még a hagyományos, klasszikus sémát követte, amikor megfelelő erőforrás és kellő idő állt rendelkezésre az egyes UAV/UAS rendszerek tesztelésére, valamint a típus-, és a légi alkalmassági megfelelés vizsgálatára és tanúsítására.

A 2022-ben és az azt követő években bekövetkező regionális, és globális kihívások azonban olyan új utakra terelték az állami célra használt UAV/UAS rendszerek tervezését is.

A hagyományos, klasszikus gondolkodást félretéve, a 'dobozból kilépve' az UAV/UAS tervezők és fejlesztők sorra olyan diszruptív, formabontó és a hagyományokkal teljes mértékben szakító ötletekkel és gondolatokkal álltak elő.

Eme megoldások biztosítják egy-egy repülési feladat (akár műveleti területi, harcászati alkalmazás) sikeres végrehajtását és a légi jármű működőképességét, mindeközben pedig, gyakorlatilag sorra figyelmen kívül hagytak minden olyan létező szabályt, normát, elvet, ami korábban már létezett akár írott, vagy akár íratlan szabályként is.

Napjainkban az állami célú, főként katonai UAV/UAS rendszerek tervezése főbb szempontjai az alábbiak: küldetését ismeretlen környezetben is sikerrel végrehajtani képes, gyorsan és olcsón megtervezett, rövid idő alatt alacsony költségek mellett tömeggyártható, gyorsan telepíthető, nagyszámú rajban, tömegesen indítható UAV/UAS rendszerek előállítása, amelyek – a műveleti területi tapasztalatok alapján – akár már 2-3 hónapig is képesek megőrizni előnyös tulajdonságaikat.

Más szóval tehát, az UAV/UAS tervezők 2-3 havonta új személettel, új eszközökre épülő új megoldásokkal kell, hogy előálljanak, amikor is a klasszikus rendszertervezés, annak szemlélete és a korábban ismert és használt módszertana egyre inkább háttérbe szorul, az előállítási költségek és a tömeges rendelkezésre állás követelménye miatt.

A műveleti területeken bekövetkezett UAV/UAS veszteségek a másik fél számára ragyogó alkalmat és korlátlan lehetőségeket teremtenek a megszerzett eszközök képességeinek megismerése terén.

A mögöttünk álló éveket, és várhatóan az előttünk álló időszakot vélhetően az is jellemzi majd, hogy bizonyos állami célú UAV/UAS rendszerek esetén a drága, lassú, igényes, kifinomult és látványos tervezések és megoldások helyét fokozatosan veszik majd át a kevésbé igényes, kevésbé kifinomult, de olcsó és megbízható megoldások, amelyek eleget tesznek az alkalmazók alapvető elvárásainak. Az UAV alkalmazók által támasztott alapkövetelmény, hogy az UAV képes legyen lerepülni a feladatát, teljesíteni a küldetését, függetlenül attól, hogy a repülése során milyen irányítástechnika jellemzőkkel is bír.

Mindazonáltal, egy esetleges új, adott PRC-termékekre kivetett, vagy kivetni tervezett szankció magával hozhatja a korlátozott hozzáférést olyan PRC COTS-termékeknek, amelyeket akár már évtizedek óta használunk, és így akár a saját UAV/UAS HW és SW eszközei kifejlesztésének szükségessége fokozottan kerül előtérbe.

## II.

Amint az az értekezés címéből is jól kiolvasható, az értekezés nem egy konkrét UAV/UAS típusra vonatkozóan fogalmaz meg állításokat, nem egy UAV típusra állít fel alkalmassági-megfelelési követelményeket, hanem az állami célú, kisméretű UAV/UAS rendszerek szélesebb körével foglalkozik.

Az értekezés egyes fejezetei azonban megkívánják, hogy egy-egy konkrét UAV típust alapul véve mutassa be szerző a tudományos eredményeit.

Az értekezésben bemutatott Trainer-60 kisméretű UAV-ra azért esett a választás, mert ezt a típust a jó repülhetősége és a könnyű irányítása miatt a kezdő modellezők is kedvelik, és széles körben használják, valamint ezen UAV térbeli mozgásának identifikált matematikai modelljei a szakirodalmakban széles körben rendelkezésre állnak.

Másodsorban pedig a Trainer-60 SUAV kategóriája már a hazai jogrendben is jól azonosítható: a műszaki jellemzője, a maximális felszálló tömege (MTOW=3500÷4200 g<sup>1</sup>) alapján vagy az 'A' (MTOW=0÷4000 g), vagy a 'B' kategóriába (4 kg ÷ 25 kg MTOW) is besorolható, a valós felszálló tömege alapján.

## III.

Az értekezés téziseit alátámasztó publikációk értelemszerűen, mindig a MATLAB® aktuális, egy-egy adott évben kiadott verziója segítségével készültek. A válaszaim elkészítésekor a MATLAB® 2024b és annak toolbox-ait, valamint a Simulink™ programokat használtam.

Az értekezés egyik fő célja az volt, hogy az UAV/UAS rendszerek tervezésekor felmerülő különféle irányításméleti kihívásokra választ adjon, valamint a rendszertervezés és a rendszervizsgálat terén olyan MATLAB® függvény könyvtárat hozzon létre, ami többféle megoldást vonultat fel egy-egy irányítástechnikai probléma megoldására.

---

<sup>1</sup> <http://phoenixmodel.com/Product.aspx?ProductId=14>. Letöltve: 2024. 10. 30.

## VÁLASZOK A BÍRÁLATBAN FELTETT KÉRDÉSEKRE

### Kérdés

- A 99. oldalon más minőségi jellemzők szerepelnek mint az előtte, vagy utána való felsorolásokban. Mi ennek az oka?

**Válasz:** Elfogadom az észrevételt, célszerű lett volna követni az 5.1. fejezetben bemutatott minőségi jellemzőket és azok jelölésrendszerét az 5.2. pontban is, mert a dolgozat 5.2. fejezetében alkalmazott új jelölések szükségtelenek.

### Kérdés

- Mi az oka, hogy a 6. fejezet egy külön egység, nem pedig egyszerűen a 7. fejezet bevezetése?

**Válasz:** az értekezés 6. fejezete lehetne a 7. fejezet bevezetése is. Mivel a 7. fejezet terjedelme azonban meglehetősen nagy, lehetségesnek véltem a bevezető rész önálló fejezetben történő megjelenítését.

### Kérdés

- A lineáris rendszertulajdonságot figyelembe véve, szükség van-e a 7.3, 7.11, 7.17 és 7.18 ábrák (b) részeire?

**Válasz:** Az értekezés 7.3., 7.11, 7.17 és 7.18 ábrák (b) részei akár elhagyhatók lehettek volna. Tekintettel arra, hogy a (b) ábrákat a MATLAB 'lsim.m' beépített függvényével számítottam, az általam készített MATLAB® script-ben fontosnak tartottam bemutatni e függvény szintaktikai különbségeit a 'step.m' függvényhez képest, aminek segítségével az (a) ábrákat számoltam.

### Kérdés

- Kérem a 148-149 oldalakon felsorolt IE, IAE, ITAE, ISE hibajelek matematikai formulával való megadását is!

**Válasz:** az integráلكritériumok matematikai alakjai az alábbiak<sup>2</sup>:

Az 'IE' kritérium:

$$J = \int_0^T e(t) dt \rightarrow Min$$

Az 'IAE' kritérium:

$$J = \int_0^T |e(t)| dt \rightarrow Min$$

---

<sup>2</sup> Csáki, F. Szabályozások dinamikája, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974.

Az 'ITAE' kritérium:

$$J = \int_0^T t^m |e(t)| dt \rightarrow \text{Min}$$

Az 'ISE' kritérium:

$$J = \int_0^T e^2(t) dt \rightarrow \text{Min}$$

Habár eme integrálkritériumokat ugyan nem használtam az értekezésemben, de mint tudományos előzményeket, fontosnak tartottam felsorolás jelleggel megemlíteni őket.

## Kérdés

- A (8.55) egyenletben a villamos szervó berendezés modelljéről azt állítja a Szerző, hogy ismeretes, de honnan? Mi a modell forrása?

**Válasz:** Az UAVkon gyakran alkalmazott Futaba típusú (Futaba S3004<sup>3</sup>) egyenáramú (DC) szervomotor matematika modelljének identifikációját, és az identifikált modell validálását A.M. Kamal, A.M. Bayoumy, és A.M. Elshabka<sup>4</sup> mutatta be.

Az általuk vizsgált UAV a kisméretű 'Tiger-Trainer' volt, ami egyike a számos 'Trainer' UAV típusnak. Bár a szerzők a cikkükben nem adják meg pontosan az általuk vizsgált UAV típusát, az vélhetően a 'Thunder Tiger Trainer 40 OBL ARF'<sup>5</sup> SUAV volt.

A szerzők a MATLAB® System Identification Toolbox segítségével az alábbi matematika modelleket identifikálták:

Egytárolós modell:

$$Y(s) = \frac{k}{1+sT} = \frac{1}{1+0,0619s}$$

Kéttárolós modell:

$$Y(s) = \frac{k}{s+2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \text{ ahol: } k = 1; \xi = 1,2; \text{ és } \omega_n = 40,0143.$$

Optimálás után a fenti átviteli függvények az alábbi alakot vették fel:

Egytárolós modell:

$$Y(s) = \frac{k}{1+sT} = \frac{1}{1+0,0693s}$$

Kéttárolós modell:

$$Y(s) = \frac{k}{s+2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \text{ ahol: } k = 1; \xi = 0,99; \text{ és } \omega_n = 28,4102.$$

A villamos beavatkozó szervek átviteli függvénye általános alakjának másik forrása: D. McLean: Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, 1990.

Bár ez a forrás alapvetően humán pilóták által vezetett légi járművek automatikus repülésszabályozásával foglalkozik, mégis, a villamos szervoberendezések viselkedésének

<sup>3</sup> <https://servodatabase.com/servo/futaba/s3004>. Letöltve: 2024. 10. 04. (Helyette később a Futaba S-U300 használatát ajánlották.)

<sup>4</sup> A.M. Kamal, A.M. Bayoumy, és A.M. Elshabka: Modeling and flight simulation of unmanned aerial vehicle enhanced with fine tuning. Aerospace Science and Technology, 51 (2016) 106-117. <http://dx.doi.org/10.1016./j.ast.2016.01.022>

<sup>5</sup> <https://www.modelaviation.com/thundertigertrainer40>. Letöltve: 2024. 10. 04.

leírására számos, a szerző által bemutatott rendszerben  $Y(s) = \frac{k}{1+sT} = \frac{20}{20+s} = \frac{1}{1+0,05s}$  alakú átviteli függvényt használt.

A felhasznált modell forrásának hivatkozása valóban elmaradt. Elfogadom, és egyetértek azzal, hogy a (8.55) egyenletet megelőző gondolatmenet megfogalmazásakor célszerű lett volna elkerülni az 'ismeretes' szó használatát, mert nem társult hozzá szakirodalmi hivatkozás: a nem pontos megfogalmazásért pedig elnézést kérek!

Az egyenáramú szervomotor fent bemutatott egytárolós dinamikus modelljei gyors működésűek, kisértékű  $T$  időállandóval rendelkeznek, és közel azonosak a D. McLean által is javasolt szervoberendezés modellel.

P. Eng<sup>6</sup> műve a szervomotorok alábbi átviteli függvényeit használta:

1. oldalkormány szervoberendezése:

$$Y_o(s) = \frac{40}{40+s} = \frac{1}{1+0.025s}$$

2. a csűrőlapok szervoberendezése:

$$Y_{cs}(s) = \frac{1}{1+0.025s}$$

3. a magasság kormánylapok szervoberendezése:

$$Y_e(s) = \frac{1}{1+0.025s}$$

Tekintettel a kisértékű  $T$  időállandókra, az értekezésemben az egytárolós matematikai modell helyett a szervomotor egyszerűsített, statikus modelljét használtam egységnyi erősítéssel, amelyek a gyors működésük miatt jól közelítik az arányos-tárolós tagok viselkedését.

## Kérdés

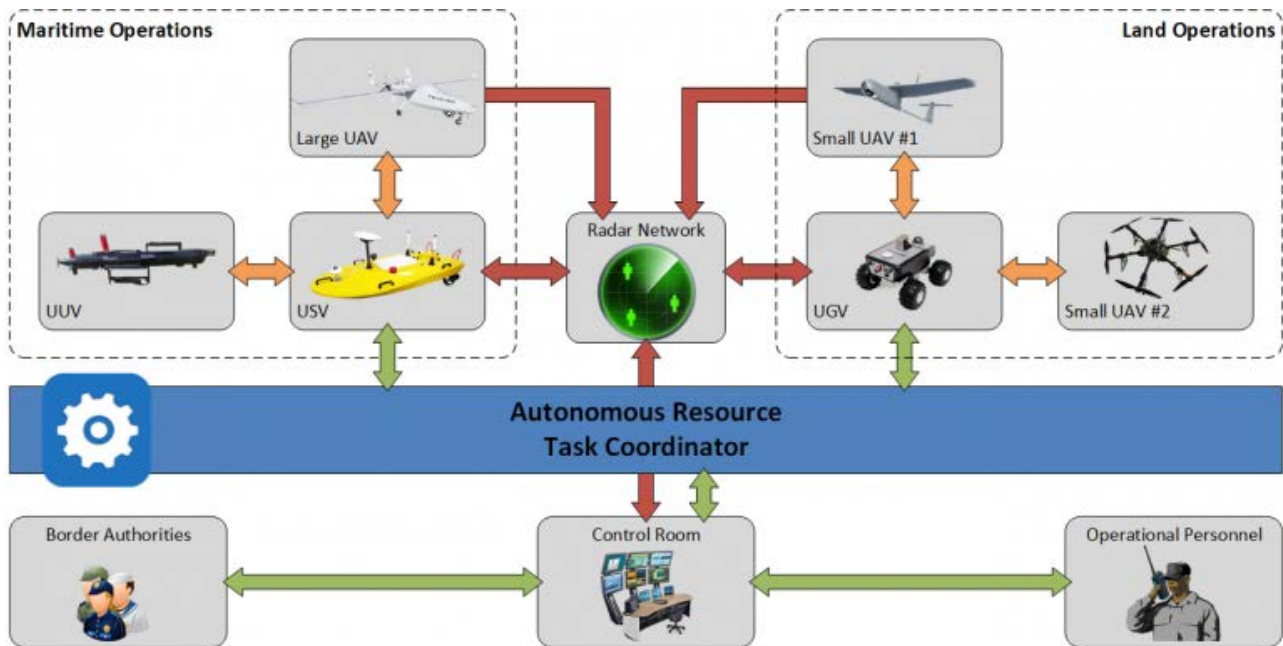
- A Night Watchbird koncepció egy multirotoros drónra épül, ugyanakkor az egész dolgot végig merevszárnyú eszköz(ök)ről szól. Mi ennek az oka?

**Válasz:** Az értekezés eme fejezetében bemutatott koncepció valóban multirotoros UAVkra épül. A koncepció vázolásának idején a forgószárnyas, multirotoros UAVkra főként az olyan perimetrikus védelmi kérdések megoldása egyik lehetséges eszközére tekintettem, amikor kis területen elhelyezkedő objektumokat, vagy lassan mozgó, vagy éppen álló 'célokat', élőlényeket vagy személyeket kell megfigyelni.

Ebben az esetben célszerű a helyből fel- és leszálló UAVkkal kiegészíteni a meglévő vagyonsvédelmi rendszereket. Ez a koncepció kiterjeszthető merevszárnyú UAVkra is, mint ahogyan a 'ROBORDER' koncepció is alkalmaz úgy kisméretű- (SUAV) merev, és forgószárnyas UAVkat, mint nagyméretű, nagy magasságban, hosszú ideig repülni képes (HALE) merevszárnyú UAVkat is.

---

<sup>6</sup> Eng, P. C. S. *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing*. PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2011.



3.9. ábra. A Roborder rendszer elvi vázlatja [Forrás: <https://roborder.eu/>].

### Kérdés

- 31. oldal 23. pont: "végül, az emisszió megfelelő szintre történő csökkentésével." itt zaj, vagy más emisszióra gondol?

**Válasz:** A 23. pontban kifejezetten a zajra gondoltam, mint az emisszió egyik lehetséges formájára.

### Kérdés

- 32. oldal: "Az illegális behatolás azonosításában segíthet, hogy a behatoló maga is tudja, hogy normasértő módon jár el, és vélelmezhetően olyan stresszes állapotban tevékenykedik, amelyet adott esetben jól azonosíthatunk is a pulzusszám, a vérnyomás, test hőmérséklete, a bőr kipárolgása és egyéb mérhető biometrikus adatok segítségével." ezeket a jellemzőket hogyan lehetséges a levegőből a Night Watchbird drón segítségével mérni, illetve melyek mérése lehetséges? Szintén itt: "Ebben az esetben a gyanús személyek előzetes azonosítása után, szükség esetén egyéb módszer is használható, például személyes beszélgetés és kikérdezés" ez a levegőből hogyan lehetséges?

**Válasz:** Az ember stresszes viselkedésének távmérése, távérzékelése részben már megoldott repülőterek biztonsági rendszereiben, de e rendszerek is csak részben képesek érzékelni a lehetséges stresszes állapotokat.

Az általam javasolt koncepcióban a földön jelenleg is alkalmazott biometrikus távérzékelők kerülnének egy mozgó UAV platformra, és az UAV szállítaná őket a mérés helyszínére.

A javasolt rendszer egy korai előre jelző rendszer, ami lehetővé teszi, hogy a humán védelmet jelentő biztonsági szakemberek a megfelelő időben, a megfelelő helyre vonuljanak ki, és elvégezzék a szükséges személyazonosítást, és a kikérdezést.

## Kérdés

- 37. oldal: "Tekintettel ezen egyszerűsítő feltételre, a merev szerkezetű UAVt később anyagi ponttal helyettesítjük, amely a háromdimenziós térben összetett (egyenes vonalú, és forgó) mozgást végez." anyagi pont esetében hogyan jellemezhető a forgómozgás?

**Válasz:** A fejezet első bekezdésének 2. és 3. mondata pontos megfogalmazásban: „A fejezet célja olyan matematikai modellek meghatározása, amelyek segítségével a SUAV térbeli mozgása jól leírható, jól modellezhető. A kisméretű pilóta nélküli légi járművet első közelítésben merev testnek tekintjük, amely a háromdimenziós térben hat szabadságfokú, összetett (egyenes vonalú, és forgó) mozgást végez.” Az UAV térbeli forgómozgását, mint merev test mozgását kell vizsgálnunk, de az egyenesvonalú mozgás vizsgálata során a merev UAV-testet anyagi pontnak is tekinthetjük.

## Kérdés

- A (4.2) egyenlet után a (4.3) egyenletből eltűnt az  $R_0$  tag, mi ennek az oka?

**Válasz:** Az UAV térbeli mozgása dinamikus modelljét átmeneti jelenségek, tranziens folyamatok leírására írtam fel, amikor is a dinamikus matematikai modell segítségével vizsgáljuk, hogy az UAV a külső erők vagy az általuk létesített nyomtatékok hatására az egyes kiindulási egyensúlyi repülési helyzetekből (állandó repülési magasságon, megadott irányon, állandó sebesség végrehajtott repülés) hogyan kerül át egy másik új egyensúlyi repülési helyzetbe.

Ily módon tehát, a kiindulási egyensúlyi helyzetet leíró, az egyensúlyi helyzetben az UAV-ra ható külső erők algebrai összege zérus, vagyis:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{T}_0 - \mathbf{X}_0 = 0,$$

ahol:  $\mathbf{T}_0$  a vonóerővektor az egyensúlyi repülési helyzetben;  $\mathbf{X}_0$  a légellenállásvektor az egyensúlyi repülési helyzetben.

A (4.2)-(4.3) egyenletek alapján elmondhatjuk, hogy az UAV egyenesvonalú mozgásának változását a külső erők  $\Delta\mathbf{R}$  megváltozása hozza létre.

## Kérdés

- Hogyan változik a (4.5) egyenlet szélzavarás esetén?

**Válasz:** A (4.5) egyenlet az UAV sebességvektorát írja le szélzavarásmentes, ideális környezetben, a 'test' koordináta-rendszer tengelyeire eső sebesség-vetületek összegeként. Ha a repülés szélzavarás mellett valósul meg, akkor a (4.5) egyenlet az alábbi alakban írható fel:

$$\mathbf{v} = \mathbf{i}(u_{UAV} \pm u_{szél}) + \mathbf{j}(v_{UAV} \pm v_{szél}) + \mathbf{k}(w_{UAV} \pm w_{szél}).$$

A légköri turbulencia  $u_{szél}$ ,  $v_{szél}$ , és  $w_{szél}$  komponens sebességvektorai modellezésére determinisztikus (pl. állandó szél, fokozatos szél) és sztochasztikus turbulencia-modellek (Dryden-modell, Kármán-modell) is rendelkezésünkre állnak.

Bár R. W. Beard és T. W. McLain<sup>7</sup> a könyvében a  $u_{UAV} - u_{szél}$ ,  $v_{UAV} - v_{szél}$ , és a  $w_{UAV} - w_{szél}$  különbségi komponenseket használja. Véleményem szerint az általam fent bemutatott egyenletben szereplő ' $\pm$ ' művelet pontosabban írja le a szélzavarás additív, háromdimenziós,

<sup>7</sup> R. W. Beard, T. W. McLain: Small Unmanned Aircraft, Princeton University Press, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012.

véletlen jellegét: például az UAV hossz tengelye mentén az  $u_{UAV} \pm u_{szél}$  sebességkomponens leírja úgy az ellenszél, mint a hátszél esetét is.

### Kérdés

- A (4.39-4.41) egyenletekből ha a  $qr$  és  $pr$  másodrendűen kicsiny tagok elhagyhatók, akkor mi indokolja a további másodrendű tagok (4.42-4.44) egyenletekben hagyását?

**Válasz:** A (4.44) egyenletet követő, és a (4.42)-(4.44) egyenletek egyszerűsítését leíró feltételeket célszerű lett volna már a (4.42) egyenlet előtt megtenni, ily módon, áttekinthetőbb lett volna a (4.42)-(4.44) egyenletek egyszerűsítés utáni alakjának megadása, amelyeknek az új alakja a következő lesz:

$$\Delta L = I_{xx}\dot{p} - I_{xz}\dot{r} \quad (4.42a)$$

$$\Delta M = I_{yy}\dot{q}, \quad (4.43a)$$

$$\Delta N = I_{zz}\dot{r} - I_{xz}\dot{p}. \quad (4.44a)$$

### Kérdés

- A (4.48-4.50) és (4.50-4.52) rendszerek elírásokat tartalmaznak, kérem a javított egyenletek megadását!

**Válasz:** Az egyenletek helyesen:

$$p = \dot{\phi} - \dot{\psi}\sin\theta,$$

$$q = \dot{\theta}\cos\phi + \dot{\psi}\cos\theta\sin\phi,$$

$$r = -\dot{\theta}\sin\phi + \dot{\psi}\cos\theta\cos\phi,$$

$$\dot{\phi} = p + \dot{\psi}\sin\theta,$$

$$\dot{\theta} = q\cos\phi - r\sin\phi,$$

$$\dot{\psi} = r\frac{\cos\phi}{\cos\theta} + q\frac{\sin\phi}{\cos\theta}.$$

### Kérdés

- A (4.57) egyenlet utolsó oszlopa alapján a föld  $\rightarrow$  test transzformációt tartalmazza, ennek fényében kérem a mátrix szorzási sorrend és a részletesen kifejtett elemek átgondolását és javítását!

**Válasz:** A légi járművek test-koordináta rendszerének az UAV tömegközéppontjában rögzített 'földi' koordináta-rendszerbe történő 'beforgatása' többféle módon is lehetséges.

A forgatás sorrendjére E. A. Aslanyan<sup>8</sup> az alábbi forgatásokat javasolta: 1) bedöntés a hossz tengely körül  $\phi$  szöggel, 2) legyezés a függőleges tengely körül  $\psi$  szöggel, és 3) bólintás a kereszt-tengely körül  $\theta$  szöggel.

D. McLean<sup>9</sup> a forgatás sorrendjére az alábbiakat javasolta: 1) legyezés a függőleges tengely körül  $\psi$  szöggel; 2) bólintás a kereszt-tengely körül  $\theta$  szöggel; 3) bedöntés a hossz tengely körül  $\phi$  szöggel.

<sup>8</sup> E. A. Aslanyan: Automatic Flight Control Systems, I. Kiev Military Aviation Technical Academy, Kiev, 1984.

<sup>9</sup> D. McLean: Automatic Flight Control Systems. Prentice-Hall, 1990.



A teljes forgatómátrix javított alakja D. McLean után a következő:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_\psi \mathbf{T}_\theta \mathbf{T}_\phi = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi s\theta & -s\theta \\ c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & c\theta s\phi \\ c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}.$$

### Kérdés

– (4.83-4.85) elég sok elírást tartalmaz, kérem a javított formában való megadását!

**Válasz:** A (4.83)-(4.85) egyenletrendszer javított alakja a következő:

$$p = \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin\theta_o - \theta(\dot{\psi}_o \cos\theta_o), \quad (4.83)$$

$$q = \dot{\theta} \cos\phi_o - \theta(\dot{\psi}_o \sin\phi_o \sin\theta_o) + \dot{\psi} \sin\psi_o \cos\theta + \phi(\dot{\psi}_o \cos\theta_o \cos\phi_o - \dot{\theta}_o \sin\phi_o), \quad (4.84)$$

$$r = \dot{\psi} \cos\theta_o \cos\phi_o - \phi(\dot{\psi}_o \cos\theta_o \sin\phi_o + \dot{\psi}_o \cos\phi_o) - \dot{\theta} \sin\phi_o - \theta(\dot{\psi}_o \sin\theta_o \cos\phi_o). \quad (4.85)$$

A fenti egyenletekben  $\phi_o$ ,  $\theta_o$  és  $\psi_o$  az Euler-szögek egyensúlyi helyzetben felvett értéke; míg  $\phi$ ,  $\theta$  és  $\psi$  az Euler-szögek változásai.

### Kérdés

– A (4.86) egyenlet  $\theta_o = 0$  állítása mennyire általánosan igaz a repülőgépekre?

**Válasz:** A repülőgépek általában nem zérus értékű, hanem kisértékű bólintó szöggel hajtanak végre repülést. Ily módon, (4.86) egyenletben helyesebb lett volna a  $\phi_o \cong 0$  feltétel alkalmazása.

A (4.86) egyenletben szereplő kitétel arra vonatkozott, hogy vízszintes síkban végrehajtott egyenesvonalú repülések esetén, ha a megfúvás alulról érkezik, akkor a repülés  $\gamma = \theta - \alpha$  pályaszöge zérus értékű.

Ebben az esetben, kis állásszögön végrehajtott, nagysebességű repülések esetére igaz csak a  $\phi_o \cong 0$  kitétel.

### Kérdés

– A (4.87) egyenletnél csúszásmentes fordulóra gondol? Ha igen, akkor az egy szimmetrikus manőver?

**Válasz:** A (4.87) egyenletben alkalmazott  $\beta_o = 0$  feltételt a repülésre általában értettem, amikor a légi járműnek akár a kézi, vagy az automatikus irányításakor a légi jármű szimmetriasíkjához képest a sárkányszerzet szimmetrikus megfúvását igyekeznek elérni.

A 'szimmetrikus' szó itt és most a légi jármű testének szimmetrikus körül áramlására vonatkozott. Tekintettel arra, hogy a repülés valós fizikai környezete, a levegő szinte sohasem nyugodt, ezért helyesebb lett volna  $\beta_o \cong 0$  feltétel megadása.

## Kérdés

- A (4.159-4.165) egyenletek inercia kombinációs tagjai nekem másképpen adódnak és a szakirodalomban (Beard, R. W. & McLain, T.W.: Small Unmanned Aircraft. Princeton University Press, Princeton and Oxford, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012) se láttam ezt a megoldást. Így kérem a forrás megadását, vagy az egyenletek felülvizsgálatát!

**Válasz:** Tekintettel arra, hogy az értekezés 4. fejezete nem korlátozódik kizárólag a kisméretű UAVkra, így e fejezetben én D. McLean: Automatic Flight Control Systems. Prentice-Hall, 1990. forrásra támaszkodtam, amely alapján a (4.159)-(4.165) egyenletek az alábbiak lesznek:

$$L'_\beta = L_\beta + I_B N_\beta, N'_\beta = N_\beta + I_A L_\beta, \quad (4.159)$$

$$L'_p = L_p + I_B N_p, N'_p = N_p + I_A L_p, \quad (4.160)$$

$$L'_r = L_r + I_B N_r, N'_r = N_r + I_A L_r, \quad (4.161)$$

$$L'_{\delta_A} = L_{\delta_A} + I_B N_{\delta_A}, N'_{\delta_A} = N_{\delta_A} + I_A L_{\delta_A}, \quad (4.162)$$

$$L'_{\delta_R} = L_{\delta_R} + I_B N_{\delta_R}, N'_{\delta_R} = N_{\delta_R} + I_A L_{\delta_R}, \quad (4.163)$$

$$I_A = \frac{I_{xz}}{I_{xx}}, \quad (4.164)$$

$$I_B = \frac{I_{xz}}{I_{zz}}. \quad (4.165)$$

## Kérdés

- A (4.201) egyenlet tartalmazza  $g$ -t míg a (4.197) nem, mi ennek az oka? A (4.64) egyenlettel összevetve  $g$  előjele melyikben helyes?

## Válasz:

A (4.64) egyenlet helyesen:

$$Z = ma_z = m(\dot{w} + pv - qu - g\cos\theta\cos\phi), \quad (4.64)$$

A (4.197) egyenlet a  $a_z$  függőleges gyorsulásnak a légijármű irányítása során létrejövő és mérhető azon komponensét írja le, amit aerodinamika- vagy propulziós erők hoznak létre. A (4.201) egyenlet pedig a függőleges tengely mentén mérhető eredő gyorsulást mutatja be, ami a külső erők megváltozása által létesített gyorsulás, és a nehézségi gyorsulás különbsége.

## Kérdés

- Mi volt a célja a (4.232) egyenletben az előző (4.218) egyenlethez képest csupán elem-sorrend cserét tartalmazó állapotvektor felírásának? Illetve (4.232) figyelembe vételével kérem, hogy értékelje (4.233) helyességét!

**Válasz:** A (4.218) és a (4.232) állapotvektorok az UAV hosszirányú mozgásának jellemzőit foglalják magukba, az állapotvektor rendezői sorrendjének megváltoztatása csak lehetőségként merült fel, mert általánosan a (4.218) alak használata terjedt el.

Az elemcserének megfelelően, a (4.233) állapotmátrix az alábbi alakot veszi fel:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \tilde{M}_u & \tilde{M}_w & \tilde{M}_q & \tilde{M}_\theta \\ X_u & X_w & 0 & -g\cos\gamma_o \\ Z_u & Z_w & U_o & -g\sin\gamma_o \end{bmatrix}, \quad (4.233)$$

### Kérdés

- A szélzavarás 4.4 ábrán publikált felépülési idejét figyelembe véve reális veszély-e, hogy a UAV sebesség szabályzója ezt nem képes kompenzálni? Különös tekintettel a szabályzó tervezéseknél alkalmazott minőségi követelményekre?

**Válasz:** A 4.4. ábra a szélesebbesség hosszirányú összetevőjének felfutását mutatja be. Az  $u_g(t) \cong 4,2 \text{ m/s}$  'maximális' szélesebbesség-összetevő értéke alapján azt mondhatjuk, hogy ez az érték sok esetben meghaladhatja az adott UAV típus repüléséhez előírt időjárási minimumokat. Az időjárási minimumok hiányában pedig, amelyek már veszélyeztetik a biztonságos repülést, nem kerülhet sor a repülésre.

Extrém esetben (4.9 ábra) pedig, az  $u_{g-extr}(t) \cong 12 \text{ m/s}$  szélesebbesség sok UAV esetében közel megegyezik magának az UAVnak a repülési sebességével.

### Kérdés

- A 4.13 ábra kapcsán a kérdésem, hogy a repülőgép törzsnek miért csak a függőleges irányú lengését kell vizsgálni? A keresztirányú lengésekkel nem lehet probléma? A (4.323-4.325) közelítések (karcsú, vékony rúd) repülőgép törzsre miért / milyen esetben (mutasson példa konstrukciót) igazak? Alapvetően a repülőgép szárny helyett miért érdemes a törzset vizsgálni?

**Válasz:** Az értekezésben azért választottam a törzs meghajlásából eredő függőleges elasztikus mozgás vizsgálatát, mert ennek a lengésképnek az ismerete elengedhetetlenül szükséges a fedélzeten elhelyezni tervezett érzékelők (pl. szögsebesség-érzékelők, gyorsulásmérők) pontos helyének meghatározásához, ellenkező esetben az érzékelők a beépítési helyükön nemcsak a légi jármű, mint merev test mozgását érzékelik, hanem a deformációk miatt bekövetkező helyzetváltozásokat is, ami a mérésben jelentős módszeres hibát eredményezhet.

A keresztirányú lengések vizsgálata, mivel az sok esetben a nagy oldalirányú erők (pl. extrém oldalszél, vagy oldalirányú erők létrehozása a legyezőszög gyors megváltoztatása érdekében) vezethetők vissza, szintén lényeges.

Ha az extrém oldalszelesség repülés közben, előre nem láthatóan alakult ki, akkor az akár a kisméretű UAV elvesztését is jelentheti. Meg kell említeni, hogy ma már sok UAV típus (pl. 'cirkáló lőszer') a repülés utolsó fázisában, a célra történő rávezetés során és a becsapódás előtti időben használja az oldalirányú erő (repülés csúszással) gyors létrehozását, a cél követése érdekében. Tekintettel arra, hogy e drónok egyszer használatosak, a sárkányszerkezet esetleges maradó deformációja nem kifejezetten lényeges szempont.

A (4.323)-(4.325) egyenlőtlenégi feltételeket „Bisplinghoff, R. L. – Ashley, H. – Halfman, R. L. *Aeroelasticity*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Cambridge, Mass., 1955.” klasszikus, iskolateremtő, máig széles körben használt könyve alapján állítottam fel.

A légi jármű elasztikus viselkedésének modellezésére, a törzs hajlító mozgásának leírására leggyakrabban olyan, mechanikából vett analógiát szokás alkalmazni, mint a vékony rúd (karcsú tartó), mert ebben az esetben lényegesen egyszerű, de még így sem egyszerű matematikai műveletekkel tudjuk leírni a légi jármű egyes részeinek aeroelasztikus mozgását.

Ez a megközelítés leginkább akkor igaz, ha a helyettesítő elrendezésben a törzs keresztmetszetének és hosszának hányadosa kisértékű, valamint azt is feltételezzük, hogy a rúd anyaga homogén, a törzs mentén a légi jármű tömege egyenletesen oszlik el.

Az értekezés két olyan HALE UAV típust is bemutat, amelyek sárkányszerkezeti kialakításában a 'törzs' valóban nagyrészt karcsú tartónak mondható.



Airbus Zephyr 8 HAPS UAV



Global Observer 'Odyssey' HALE UAV

4.12. ábra. Aeroelasztikus UAV sárkányszerkezetek.

Leggyakrabban a légi járművek törzsének deformációit szokás vizsgálni, mert az alakjánál, és egyéb jellemzőinél fogva leginkább a törzs hajlamos az elasztikus deformációkra. A szárnyak, alakjuknál, belső szerkezetükénél, tömegükénél fogva, kevésbé hajlamosak a rugalmas deformációkra.

Ez rendszerint igaz a hagyományos építésű, klasszikus aerodinamikai elrendezéssel bíró légi járművekre, viszont olyan légi járművek esetén, amelyek nemhagyományos tervezésűek, mint pl. NASA Pathfinder, NASA Centurion, NASA Helios UAV, már nem lehet eltekinteni a szárnyak deformációjának vizsgálatától.



1. ábra: Aeroelasztikus UAV sárkányszerkezetek.  
NASA Pathfinder



NASA Centurion



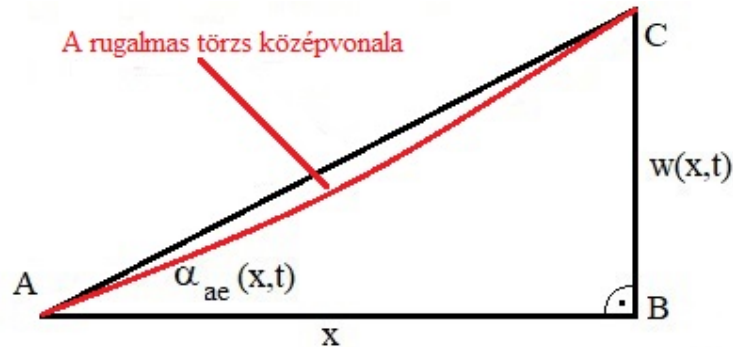
NASA Helios

1. ábra: Aeroelasztikus UAV sárkányszerkezetek (Folyt.)

## Kérdés

– A (4.312) egyenletben a két szög összegéből hogyan lesz függőleges elmozdulás?

**Válasz:** Egészítsük ki – képzeletben – a (4.14) ábrát baloldaltól az alábbi 'ABC' derékszögű háromszöggel, ami a (4.14) ábrán ugyan nem került jelölésre, de értelemszerűen figyelembe vettem azt:



2. ábra: A (4.14) ábra kiegészítése.

A fenti ábrán az 'ABC' derékszögű háromszög átfogója – kis elhajlások esetén, és eltekintve a törzs esetleges elcsavarásától – jól közelíti a rugalmas törzs középvonalát. A fenti ábra alapján felírhatjuk, hogy:

$$\operatorname{tg} \alpha_{ae}(x, t) = \frac{w(x, t)}{x}.$$

Kis értékű szögekre igaz, hogy:

$$\operatorname{tg} \alpha_{ae}(x, t) \cong \alpha_{ae}(x, t).$$

Rövid időpillanatokra, a rugalmas törzs középvonalának kismértékű elhajlása esetén a rugalmas törzs adott  $x$  koordinátájú helyén a törzs-szegmens  $w(x, t)$  elmozdulása tehát a következő egyenlettel írható le:

$$w(x, t) = \operatorname{tg} \alpha_{ae}(x, t) \cdot x \cong \alpha_{ae}(x, t) \cdot x.$$

## Kérdés

– A (4.365) egyenletben feltüntetett egyenletes erőterhelés a repülőgép törzsre mennyire igaz? A szárny és vezérsík befogások nem befolyásolják?

**Válasz:** A (4.365) egyenlet azzal számol, hogy a légijármű törzs vékony rúddal modellezett, amelynek azonos a keresztmetszete, és homogén az anyaga. A gyakorlatban felmerül a kérdés, hogy egy légijárműre hogyan teljesül az a feltétel, hogy a keresztmetszete és a hosszának aránya nagyon kicsi. Ezt a követelményt még szakkönyvek sem írják le, az egyszerűbben kezelhető matematikai modellek felállítására érdekében inkább szokás vállalni a modellezésben a nagyobb hibákat. Természetesen, ha a törzs fizikai méreteire még érvényesül is a fenti kritérium, a törzs valós fizikai kialakítása, a törzsre szerelt szárnyak, a vezérsíkok, a futóművek a törzsön nem egyenletes terhelés eloszlást hoznak létre.

Ily módon, a (4.365) egyenlettel megadott egyenletes terhelést a törzs egyes szegmensein, kis fizikai méretein akár még tekinthetjük állandónak is, de a törzs teljes hosszában már nem beszélhetünk egyenletes erőterhelésről.

Mind ezektől függetlenül, a szakmai berkekben is alpműnek tekinthető "Bisplinghoff, R. L. – Ashley, H. – Halfman, R. L. *Aeroelasticity*, Addison–Wesley Publishing Company, Inc., Cambridge, Mass., 1955." könyv eme módszeres hibát is felvállalva, javasolta e módszertant, és ezt a matematikai modellezést.

### Kérdés

- A 94. oldalon a *túlszabályzás és függvény csúcsideje* minőségi jellemzőkre milyen más elnevezést tud mondani?

**Válasz:** A 'túlszabályzás' mellett sokszor használják a 'túllövés' (overshoot), míg a 'csúcsidő' (peaktime) helyett a maximális idő ( $T_{max}$ ) elnevezéseket<sup>10</sup>.

### Kérdés

- Az (5.7) és (5.8) egyenletekben  $1/T_s$  és  $1/T_r$  az átviteli függvény milyen paraméterei?

**Válasz:** A (5.7), és az (5.8) hivatkozott egyenletekben, a nevezőben a spirálmozgást leíró dinamika nevezője  $(1 + sT_s)$ , míg az orsózó mozgást leíró dinamika nevezője  $(1 + sT_r)$  – a repülésmechanikában általánosan elfogadott – időállandós alakú. Ezen tagokból kiemelve a  $T_s$  és a  $T_r$  időállandókat, kapjuk az (5.7) és az (5.8) egyenletekben az  $1/T_s$  és az  $1/T_r$  alakokat. Ezt a gyöktényező alakot jól használhatjuk például a stabilitásvizsgálatok során.

### Kérdés

- 98. oldal: "E minőségi jellemzők a klasszikus szöghelyzet stabilizáló robotpilóta üzemmódokon alkalmasak a repülésszabályzás minőségének megítélésére." Más üzemmódokon miért nem? Ott milyen minőségi jellemzőket kellene alkalmazni?

**Válasz:** A 98. oldalon javasolt minőségi jellemzők természetesen nemcsak a klasszikus szöghelyzet stabilizáló üzemmódokon, hanem egyéb üzemmódokon (magasságstabilizálás, sebességstabilizálás, automatikus felszállás, automatikus leszállás stb.) is alkalmasak a minőség megítélésére. A minőségi jellemzők felvétele alapvetően azokra a repülési üzemmódokra vonatkozik, amelyek során a légijármű a klasszikus, paramétereiben (pl. állásszög, csúszásszög, repülési magasság, repülési sebesség stb.) korlátozott repülési feladatokat hajt végre, amikor az adott repülési üzemmódokon a légijárművek sem túlzottan agilis, sem pedig agresszív manővereket (pl. cirkáló lőszerek célba juttatása) sem valósítanak meg. Az agilis, és az agresszív viselkedést mutató UAVk repülése esetén nem a repülésszabályzás átmeneti folyamatainak minősége, hanem a célba jutás sikeressége, a találati pontosság lesz az alapvető követelmény, amit akár nem szokványos minőségi jellemzők mellett is, azokat akár be nem tartva, de el kell érni.

### Kérdés

- Kérem, hogy vezesse le az (5.17) átviteli függvényt (5.15) és megfelelő kontroller struktúra figyelembe vételével, kapcsolatot teremtve  $K_{cl}$ ,  $T_{Rcl}$  és  $K_\phi$ ,  $T_R$  között! A hipotetikus UAV modell helyett helyettesítse be a Trainer-60 Boomerang UAV adatait és úgy jelenítse meg és jellemezze az 5.1, 5.2 és 5.3 ábrákon bemutatott viselkedést!

<sup>10</sup> <https://mogi.bme.hu/TAMOP/robotiranyitasok/ch02.html>. Letöltve: 2024. 10. 06.

**Válasz:** Az értekezés 5. fejezete nem egy-egy konkrét UAV típusalkalmasságának, megfelelésének megítélését hivatott szolgálni, hanem UAV típustól függetlenül, azok egy-egy osztályára javasolta azokat a mutatókat, mérőszámokat, amelyek segíthetik egy-egy UAV típusalkalmasságának eldöntését.

Tekintettel arra, hogy a jelenleg is használt MIL-F-8785C, és a MIL-STD-1797A szabványok légi jármű típusra, a repülés különféle fázisaira (felszállás, útvonalrepülés, szöghelyzet stabilizálás, magasságstabilizálás, sebességstabilizálás, kismagasságú repülés, leszállás, stb.), a fedélzeti rendszerek működőképességének különféle állapotaihoz (üzemképes légi jármű, kisebb meghibásodásokkal működő légi jármű; repülni még képes, de nagyobb meghibásodásokkal működő légi jármű) különféle minőségi követelményrendszert, és annak különféle mértékeit rendelik.

Ily módon, a céлом az volt, hogy egy olyan módszertant dolgozzak ki az UAV tervezők és alkalmazók számára, amely a dinamikus minőségi követelmények rendszere segítségével támogatja az egyes UAV típusok robotpilótáinak tervezését.

Mivel a hazai jogalkotás nem követte a nemzetközi folyamatokat és trendeket, ezért az általam javasolt eljárás és módszertan egyedüli, és előre mutató a maga nemében.

Bár az EU kiadott két UAV-szabályozást<sup>11</sup> (2019/945., és 2019/947.), amelyek a nem állami célú UAVk alkalmazását voltak hivatottak szabályozni.

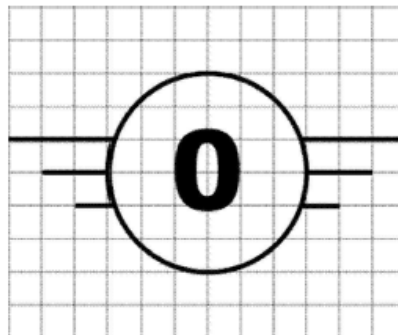
A 2019/945. rendelet is az UAVk tömege alapján osztályozza e légi járműveket, de azok típusanúsítási kritériumrendszerével, vagy a légi alkalmassági feltételek definiálásával egyáltalán nem foglalkoznak.

MELLÉKLET

1. RÉSZ

**A C0 osztályba tartozó pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozó követelmények**

A C0 osztályba tartozó UAS-ek esetében az UA-t a következő osztályazonosító címkével kell ellátni:



A C0 osztályba tartozó UAS-ek az alábbi követelményeknek kell, hogy megfeleljenek:

- (1) maximális felszállási tömegük a hasznos teherrel együtt nem haladhatja meg 250 g-ot;

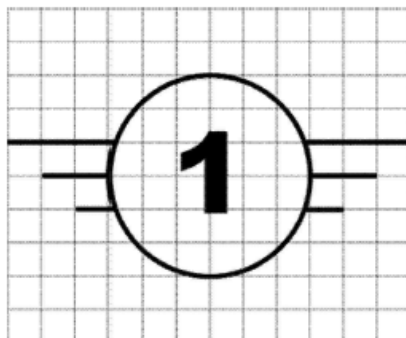
<sup>11</sup> <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu>. Letöltve: 2024. 11. 03.



## 2. RÉSZ

### A C1 osztályba tartozó pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozó követelmények

A C1 osztályba tartozó UAS-ek esetében az UA-t a következő osztályazonosító címkével kell ellátni:



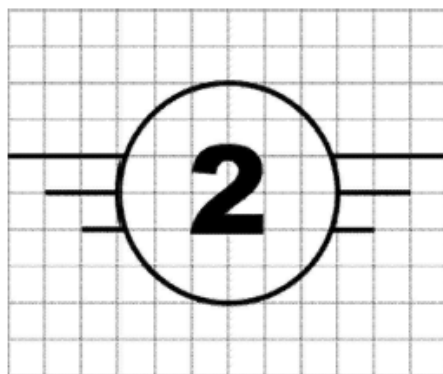
A C1 osztályba tartozó UAS-ek az alábbi követelményeknek kell, hogy megfeleljenek:

- (1) vagy olyan anyagból kell készülniük és olyan fizikai és teljesítményjellemzőkkel kell rendelkezzenek, amelyek biztosítják, hogy végsebesség mellett az emberi fejnek való ütközéskor, a fejnek átadott energia kevesebb, mint 80 J, vagy a maximális felszállási tömegük a hasznos teherrel együtt nem érheti el 900 g-ot;

## 3. RÉSZ

### A C2 osztályba tartozó pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozó követelmények

A C2 osztályba tartozó UAS-ek esetében az UA-t a következő osztályazonosító címkével kell ellátni:



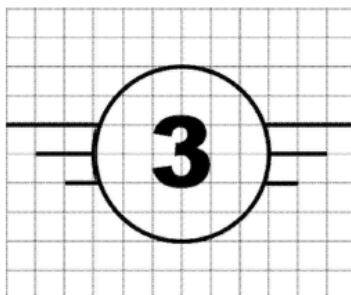
A C2 osztályba tartozó UAS-ek az alábbi követelményeknek kell, hogy megfeleljenek:

- (1) maximális felszállási tömegük a hasznos teherrel együtt nem haladhatja meg 4 kg-ot;

## 4. RÉSZ

### A C3 osztályba tartozó pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozó követelmények

A C3 osztályba tartozó UAS-ek esetében az UA-t a következő osztályazonosító címkével kell ellátni:



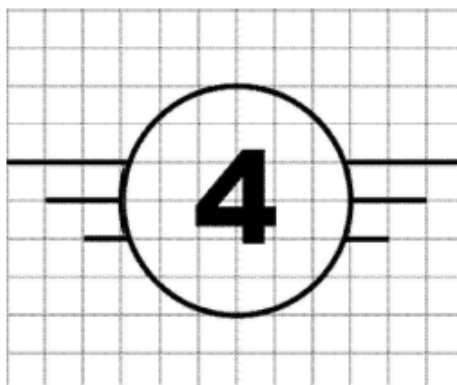
A C3 osztályba tartozó UAS-ek az alábbi követelményeknek kell, hogy megfeleljenek:

- (1) a maximális felszállási tömegük a hasznos teherrel együtt kevesebb 25 kg-nál, valamint maximális jellemző méretük kisebb, mint 3 m;

5. RÉSZ

A C4 osztályba tartozó pilóta nélküli légi jármű-rendszerekre vonatkozó követelmér

A C4 osztályba tartozó UAS-ek esetében az UA-t a következő címkével kell ellátni:



A C4 osztályba tartozó UAS-ek az alábbi követelményeknek kell, hogy megfeleljenek:

- (1) maximális felszállási tömegük a hasznos teherrel együtt nem haladhatja meg 25 kg-ot;

Az értekezés 99. oldala, utolsó előtti bekezdésében foglaltak arra utalnak, hogy az általam javasolt minőségi követelményrendszer jól használható állami célú pilótanélküli légi járművek hatósági tanúsítása során, de azt egy-egy adott UAV típusra, természetesen megfelelően módosítani szükséges.

A válaszadás előtt, említsük meg, hogy a NATO STANAG 4671 – 'Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements' (2009) szabványt hazánk ugyan ratifikálta, de nem vezette be a hazai jogrendbe. E NATO szabvány sem a hosszirányú, sem pedig az oldal/keresztirányú mozgásra sem határoz meg követelményeket:

STANAG 4671  
(Edition 1)

	<p>(3) Level flight, including mission relevant special manoeuvres;</p> <p>(4) Descent;</p> <p>(5) Go-around (except where UAV is designed to be recovered by parachute, see USAR.290); and</p> <p>(6) Landing (power on and power off) with the wing flaps extended and retracted (except where UAV is designed to be recovered by parachute, see USAR.290).</p> <p>(7) Ground taxi (see USAR.231 to USAR.235).</p> <p>(b) It must be possible to make a smooth transition from one flight phase and/or condition to another (including turns and slips) without danger of exceeding the limit load factor, under any probable operating condition, (including, for multi-engined UAVs, those conditions normally encountered in the sudden failure of any engine).</p> <p>(c) Not applicable</p>
	<p>145 Longitudinal control</p> <p>Not applicable. (see USAR.171)</p>
	<p>147 Directional and lateral control</p> <p>Not applicable. (see USAR.171)</p>

	(c) In addition to data obtained by computation or modelling, stability analysis must be supported by the results of relevant flight tests.
	175 Demonstration of static longitudinal stability Not applicable.
	177 Static directional and lateral stability Not applicable.
	181 Dynamic stability Not applicable.

asonlóképpen, a NATO MIL-F-8785C szabvány, ami a MIL-STD-1797A szabvány, majd a MIL-HDBK-1797A (2004 –) katonai kézikönyv szerves részét képezi, sem került bevezetésre a hazai jogrendbe, ellentétben más országokkal, akik terveznek, fejlesztenek, gyártanak, és a nemzetközi piacon is értékesítenek merevszárnyú SAUV légi járműveket.

Az European Defense Agency (EDA) általi kiadott 'European Military Airworthiness Requirements' (EMAR) követelményeket hazánk sem a típus-, sem pedig a légi alkalmasság vizsgálatára sem alkalmazza. Az EMAR-követelmények csak említés szintjén jelenik meg 'Az állami légi jármű nyilvántartásáról, gyártásáról és javításáról, valamint annak típus- és légi alkalmasságáról' szóló 269/2024. (IX.17.) Kormányrendelet 14.§. (3) pontjában, aminek értelmében a gyártó-, javító- és a karbantartó szervezetek az EMAR szerint kell, hogy működjenek, de a gyártók által gyártott UAVk hatósági vizsgálata tekintetében nem fogalmaz meg semmilyen ajánlást, vagy egyéb más követelményt sem.

### III. FEJEZET

#### LÉGIJÁRMŰ TERVEZŐ, GYÁRTÓ, JAVÍTÓ, KARBANTARTÓ SZERVEZET TEVÉKENYSÉGÉNEK ENGEDÉLYEZÉSE

##### 7. Állami légi járművet tervező, gyártó, javító, karbantartó szervezet tevékenységének engedélyezése, a működési engedély kiadása

- 13. §** (1) Állami légi jármű vagy légi jármű komponens tervezését, gyártását, javítását, karbantartását a Hatóság engedélyével rendelkező jogi személy végezheti.
- (2) A működési engedéllyel rendelkező jogi személy (a továbbiakban: engedélyes) a légi jármű és a légi jármű komponensei üzemidejét – ideértve a naptári, működési korlátozásokat – saját vagy más, erre jogosult szervezet üzemeltetési, javítási tapasztalatai alapján, továbbá a típusra elfogadott műszaki dokumentumok figyelembevételével megállapítja, és azokat a Hatóság és a fenntartó által az adott légi jármű típushoz előírt módon rögzíti a légi jármű karbantartási rendszerében és dokumentációjában.
- (3) Az engedélyes a légi jármű üzemi naplók és a törzskönyvek vezetését a gyártói előírásnak, valamint a fenntartó által meghatározottaknak megfelelően végzi.
- (4) Az engedélyes karbantartó szervezet képviselője a karbantartási feladat végrehajtását követően a légi jármű ismételt üzembeállítása érdekében üzemképességi tanúsítványt állít ki, amely tartalmazza az elvégzett karbantartás részleteit, befejezésének időpontját és a tanúsítványt kiállító személy személyazonosító adatait.
- (5) A javító- és karbantartó tevékenység, valamint a légi jármű festése a gyártó előírásainak megfelelően végezhető.
- 14. §** (1) A Hatósághoz benyújtott működési engedély iránti kérelemben fel kell tüntetni
- a kérelem tárgyát, az engedélyezéssel érintett tevékenység megnevezését,
  - a gyakorolni kívánt tevékenységgel érintett légi jármű, légi jármű komponens típusát és
  - a hatósági szemle lefolytatására alkalmas időtartam kezdő időpontját.
- (2) Az (1) bekezdés szerinti kérelemhez csatolni kell a kérelmező szervezet szervezeti kézikönyvét és a kérelmezett tevékenységgel érintett típusokra vonatkozó, a tevékenység folytatásához szükséges iratokat.
- (3) A kérelmező szervezet a Szervezeti Kézikönyvét a kérelmezett tevékenységre vonatkozó Európai Katonai Légi alkalmassági Követelményrendszerben meghatározott szerkezetben és tartalommal állítja össze.

Az e területen meglévő hazai jog 'A pilóta nélküli állami légi járművek repüléséről' szóló 38/2021. (II.2.) Kormányrendelet, amely a kisméretű, az 'A1'-'B2' (0 ÷ 25 kg MTOW) kategóriákba sorolt

			üzemei)	
5.	<b>B</b>	4 kg fölött és 25 kg-ig	<b>B1</b>	1. Üzemben tartói nyilatkozat 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele
			<b>B2</b>	1. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele 2. Típusalkalmassági bizonyítvány vagy EU jogszabályi megfelelést igazoló gyártói CE jelölés vagy hatóság által kiadott tanúsítvány 3. Repülésbiztonsági szervezet 4. Kockázatelemzés
6.	<b>A</b>	4 kg és az alatt	<b>A1</b>	1. Üzemben tartói nyilatkozat 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele
			<b>A2</b>	1. Hatóság által jóváhagyott intézkedés 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele 3. Repülésbiztonsági szervezet 4. Kockázatelemzés

UAVk esetében a 38/2021. (II.2) rendelet 10.§.(2) pontja tételesen sorolja fel az UAVk felszereltségi követelményeit, melyek az alábbiak:

### 10. Felszereltségi követelmények

- 10. §** (1) A pilóta nélküli állami légi jármű rendszer felszereltségi követelményét a pilóta nélküli állami légi jármű kategóriája határozza meg.
- (2) Az „A1”-„B2” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi járműnek rendelkeznie kell legalább
- magasság- és sebességparamétereket meghatározó berendezéssel,
  - pillanatnyi pozícióra vonatkozó, a magasság és WGS-84 földrajzi koordináta-rendszer szerinti koordináta- adatokat gyűjtő és a földi munkaállomáshoz történő továbbításra alkalmas berendezéssel,
  - térbeli helyzetet meghatározó berendezéssel,
  - rádiókapcsolat minőségét visszajelző berendezéssel,
  - a rendeltetésszerű működést figyelő állapotjelzőkkel,
  - üzemanyag és akkumulátor aktuális töltöttségi szintjét jelző berendezéssel és
  - a pilóta nélküli légi jármű rendszer esetében a repülési paramétereket rögzítő berendezéssel.

A fenti kivágásból jól látható, hogy a kisméretű, állami céllal alkalmazott UAVkat nem kötelező ellátni robotpilótával, vagy akár automatikus repülésszabályozó rendszerrel. Ily módon, értelemszerűen, az esetlegesen alkalmazott robotpilóták működésének minőségi jellemzőit sem szabályozzák. E vizsgálatok a 32.§. szerint nem képezik a típus tanúsítás részét:

### 21. Típusalkalmassági vizsgálat

- 32. §** (1) Pilóta nélküli állami légi jármű csak abban az esetben tartható üzemben, ha olyan típushoz tartozik, amelyre az illetékes hatóság az elvégzett típusalkalmassági vizsgálat alapján típusalkalmassági bizonyítványt adott ki.
- (2) Az „A1”-„B1” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű üzemeltetése típusalkalmassági eljárás nélkül végezhető.
- (3) A „B2” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű üzemeltetése típusalkalmassági eljárás nélkül végezhető, ha az adott típusú pilóta nélküli állami légi járműhöz a gyártó által kiadott, a pilóta nélküli állami légi jármű uniós harmonizációs jogszabályban rögzített követelményeknek való megfelelést igazoló jelölés (CE jelölés) tartozik, vagy az üzemben tartó igazolja valamely illetékes NATO- vagy EU-tagállam hatóságának döntését arról, hogy a légi jármű építése megfelel a nemzetközi előírásoknak, határozatoknak és a repülésbiztonsági követelményeknek. Igazolás hiányában a típusalkalmassági eljárást a 2. mellékletben meghatározottak szerint kell végrehajtani.

Mindazonáltal, előfordulhat, hogy nem hazai légtérben kell repülési feladatokat (pl. nemzetközi árvízvédelmi munkák; erdő-, és bozóttüzek elleni védekezés stb., 'légi cél' repülése nemzetközi gyakorlatokon stb.) végrehajtani, és az UAV bevetések olyan országokban történnek, ahol a saját

nemzeti joguk már tételesen szabályozza pl. az UAVk felszereltségét, és előírják a robotpilóták használatát, és azokon különféle vészhelyzeti, automatikus repülési algoritmusok futását (pl. 'Visszatérés', vagy 'Kényszerleszállás' stb.).

A jelenleg hatályos hazai jogszabályok, és az eddig még be nem vezetett nemzetközi jog is úgy gondolkodik az UAVk típusalkalmasságáról, hogy:

- a követelményrendszert mindig egy adott UAV kategóriára állítja fel;
- egy-egy kategórián belül még előfordulhat 'finomabb' bontása is az adott UAV kategóriának (pl. a 38/2021. (II.2.) Kormányrendelet az 'A' kategórián belül megkülönböztet 'A1' és 'A2' osztályokat, míg a 'B' kategórián belül pedig 'B1' és 'B2' osztályokat);
- a követelményeket rendszerint az automatikus repülésszabályozó rendszer üzemmódjaira (pl. felszállás, leszállás, sebességszabályozás, magasságszabályozás, terepkövetés, VOR/DME navigáció, Euler-szögek stabilizálása stb.);
- a követelményeket akár a repülés egyes fázisaira is megfogalmazhatják (pl. a leszállás 'Flare' kilebegtetés része);
- sokszor előfordul, hogy valamilyen fedélzeti meghibásodás miatt, annak veszélyességi szintje függvényében új, a teljesen üzemképes rendszer eredeti jellemzőihez képest valamilyen szintű degradálással, lerontva adnak meg minőségi jellemzőket (pl. MIL-HDBK-1797A);
- a minőségi jellemzők sokszor tükrözik vagy a hajózó személyzet (Cooper-Harper skála<sup>12</sup>), vagy akár az utasok szubjektív komfort-, vagy diszkomfort érzetét leíró véleményeket is;
- bár a jelenleg hatályos követelmény-, szabály-, vagy szabványrendszerek alapvetően a hagyományos légijárművekre készültek, azoknak mégis számos eleme közvetlenül is használható az UAVk típusánusítására, de eme, már létező szabályok módszertana, valamint a minőség fontosságáról való gondolkodás mindenképpen átemelhető az UAVkra felállítandó követelményrendszer kidolgozásakor.

Értekezésem UAVk típusalkalmassági vizsgálatokkal foglalkozó részei hiánypótlók, és segíthetik a jogalkotót az UAVk tervezése-, és gyártására esetlegesen később megalkotandó tételes jog összeállításában.

Az oldalirányú, rövidperiodikus mozgás orsózó szögsebességére igaz, hogy:

$$p(s) = s\phi(s) \rightarrow \phi(s) = \frac{p(s)}{s}.$$

Ily módon, az értekezés (5.12)-(5.13) egyenletei az alábbi, javított alakban írhatók fel<sup>13</sup>:

$$W_1(s) = \frac{p(s)}{\delta_A(s)} = \frac{K_\phi(s^2 + 2\xi_\phi\omega_\phi s + \omega_\phi^2)e^{-\tau_{ep}s}}{(s^2 + 2\xi_D\omega_D s + \omega_D^2)(s+1/T_S)(s+1/T_R)}, \quad (5.12)$$

vagy

$$W_2(s) = \frac{\phi(s)}{\delta_A(s)} = \frac{K_\phi(s^2 + 2\xi_\phi\omega_\phi s + \omega_\phi^2)e^{-\tau_{ep}s}}{s(s^2 + 2\xi_D\omega_D s + \omega_D^2)(s+1/T_S)(s+1/T_R)}, \quad (5.13)$$

valamint az (5.15)-(5.16) egyenletek javítva az alábbiak lesznek:

$$W_1(s) = \frac{p(s)}{\delta_A(s)} \cong \frac{K_\phi}{(s+1/T_R)}, \quad (5.15)$$

vagy

$$W_2(s) = \frac{\phi(s)}{\delta_A(s)} \cong \frac{K_\phi}{s(s+1/T_R)}. \quad (5.16)$$

<sup>12</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Cooper-Harper\\_rating\\_scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Cooper-Harper_rating_scale). Letöltve: 2024. 10. 17.

<sup>13</sup> D. McLean: Automatic Flight Control Systems. Prentice-Hall, 1990.

Figyelembe véve a (7.2) állapotegyenletet, a Trainer-60 SUAV oldalirányú, rövidperiodikus mozgásának differenciálegyenlete a következő lesz:

$$\dot{p} = -19,9149p - 23,8289\delta_a.$$

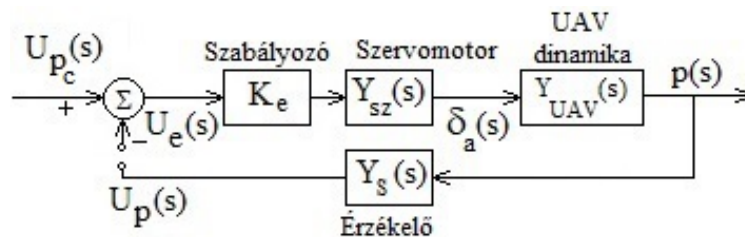
A fenti egyenlet Laplace-transzformáltja, zérus kezdeti feltételek mellett:

$$sp(s) = -19,9149p(s) - 23,8289\delta_a(s).$$

A Trainer-60 UAV orsózó mozgásának átviteli függvénye pedig a következő lesz:

$$\frac{p(s)}{\delta_a(s)} = \frac{23,8289}{s+19,9149} (-\delta_a(s)) \cong \frac{1,1965}{1+0,0502s} (-\delta_a(s)) = \frac{K_\phi}{(1+T_Rs)} (-\delta_a(s)).$$

A csűrőlapok  $\delta_a$  szöghelyzetváltozásának (-) előjele olyan mérőirányt jelent, amikor a  $p(s)$  orsózó szögsebesség változása pozitív lesz. A dőlési (orsózó) csillapító automata hatásvázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra: A Trainer-60 UAV dőlési csillapító automatája.

A 3. ábrán:  $U_{p_c}(s)$  a  $p_c(s)$  z orsózó szögsebesség referencia értékét reprezentáló villamos jel;  $U_p(s)$  a  $p(s)$  orsózó szögsebesség pillanatnyi értékét reprezentáló villamos jel,  $U_e(s)$  az  $e(s)$  hibajel értékét reprezentáló villamos jel.

A 3. ábrán látható csillapító automata egyes elemeit az alábbi átviteli függvényekkel írjuk le:

$$K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; Y_{UAV}(s) = \frac{p(s)}{\delta_a(s)} = \frac{23,8289}{s+19,9149} = \frac{1,1965}{1+0,0502s}; Y_{sz}(s) = \frac{1}{1+0,0693s}; Y_s(s) = 0,5$$

A 3. ábra alapján az  $U_p(s)$  ellenőrző jel ágában felnyitott szabályozási kör átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_F(s) = K_e Y_{sz}(s) Y_{UAV}(s) Y_s(s) = K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,1965}{1+0,0502s} 0,5,$$

ami alapján megállapíthatjuk, hogy a szabályozási rendszer 0-típusú, vagyis nem tartalmaz integráló tagot. E típusszám alapján a zárt szabályozási rendszer alapjel követési tulajdonságai már előre jelezhetők<sup>14</sup>:

- a 0-típusú szabályozási rendszer a 0-típusú bemeneti vizsgáló jelet (Dirac-függvény) maradó hiba nélkül leköveti;
- a 0-típusú szabályozási rendszer az 1-típusú jelet (ugrásfüggvény) csak maradó hibával képes lekövetni;
- a 0-típusú rendszer a 2-, és magasabb típusszámú jeleket nem képes lekövetni.

A továbbiakban vizsgáljuk meg az értekezésben közreadott, általános zárt szabályozási rendszer, és a Trainer-60 UAV oldalirányú mozgása csillapító automatájának válaszfüggvényeit.

## I. A súlyfüggvények összehasonlítása.

Az alapjel követési tulajdonságok vizsgálatához határozzuk meg a 3. ábrán látható zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvényét, ami – elhagyva a villamos feszültségek jelölését – a következő alakban írható fel:

<sup>14</sup> Csáki, F., Bars, R. Automatika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.

$$W(s) = \frac{p(s)}{p_c(s)} = \frac{K_e Y_{SZ}(s) Y_{UAV}(s)}{1 + K_e Y_{SZ}(s) Y_{UAV}(s) Y_S(s)} = \frac{K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,1965}{1+0,0502s}}{1 + K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,1965}{1+0,0502s} \cdot 0,5} = \frac{1,1965 K_e}{(1+0,0502s)(1+0,0693s) + 0,59825 K_e} = \frac{1,1965 K_e}{0,00410256 \cdot s^2 + 0,1285 \cdot s + (1+0,59825 K_e)}$$

Az orsózó szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye:

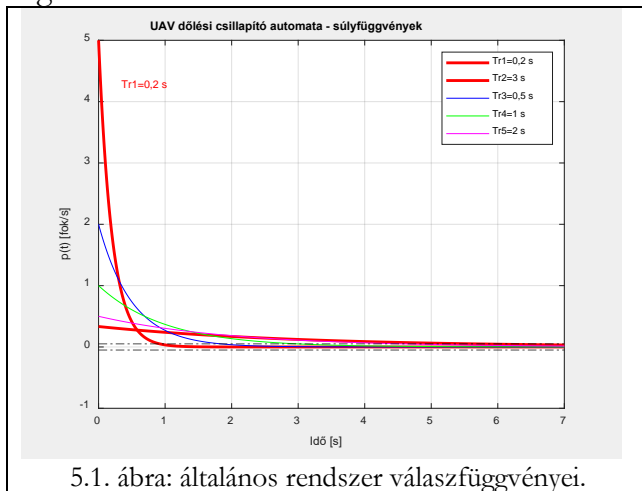
$$p_c(t) = \delta(t) \rightarrow p_c(s) = 1.$$

A Laplace-transzformáció végérték tételét felhasználva a vizsgált orsózó csillapító automata válaszfüggvényének végértéke az alábbi módon határozható meg:

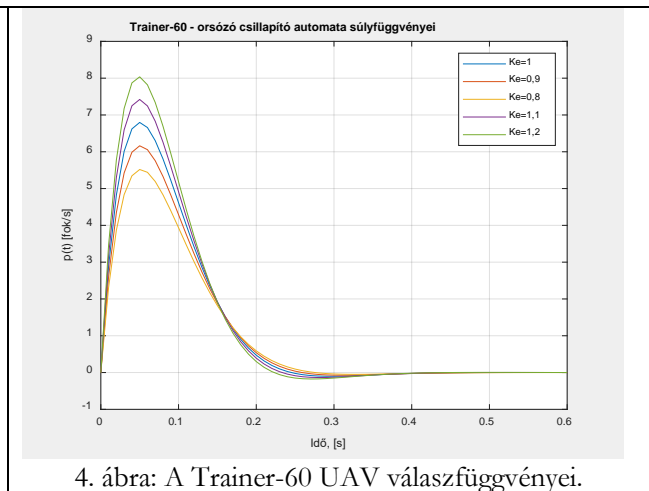
$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s p(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) p_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1,1965 K_e}{0,00410256 \cdot s^2 + 0,1285 \cdot s + (1+0,59825 K_e)} = 0,$$

tehát, kellően nagy időkre az UAV súlyfüggvényei visszatérnek a kezdeti zérus értékhez.

A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a 4. ábra segítségével végezzük el.



5.1. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



4. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A kapott új eredmények alapján elmondhatjuk, hogy:

- mindkét rendszer, úgy az értekezésben közölt általános, mint a Trainer-60 UAV dinamikájának, és a zárt szabályozási rendszerének figyelembevételével meghatározott rendszer alapjel követő: a bemeneti  $p_c(t) = \delta(t)$  jelet maradó hiba nélkül leköveti: kellően nagy időkre a rendszer válaszfüggvénye visszatér a kezdeti, zérus értékű állapotába;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényeinek amplitúdója kismértékben növekszik az értekezésben közöltekhez képest;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényei jóval gyorsabban csillapodnak le, mint az értekezésben közölt zárt rendszer súlyfüggvényei;
- a Trainer-60 UAV  $K_e$  szabályozójának erősítését változtatva elmondhatjuk, hogy az erősítés növekedésével növekszik a válaszfüggvények maximális értéke, míg eme erősítés csökkenése a függvénymaximumok csökkenéséhez vezet.

## II. Az átmeneti függvények összehasonlítása.

Az orsózó szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye most:

$$p_c(t) = 1(t) \rightarrow p_c(s) = \frac{1}{s}.$$

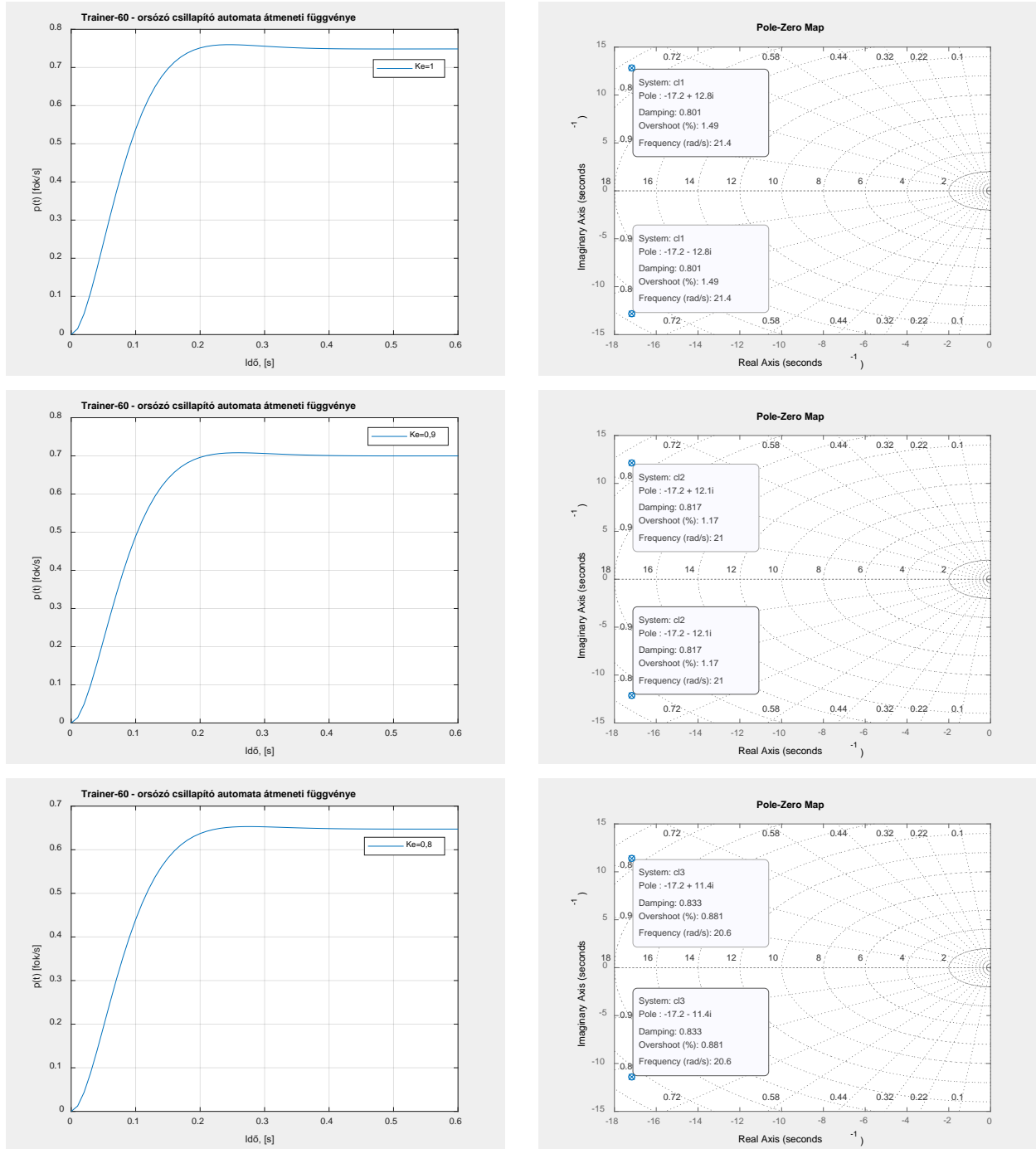
A Laplace-transzformáció végérték tételét felhasználva, a vizsgált orsózó csillapító automata válaszfüggvényének stacioner értéke a következő lesz:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sp(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sW(s)p_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1,1965 K_e}{0,00410256 \cdot s^2 + 0,1285 \cdot s + (1 + 0,59825 K_e)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1,1965 K_e}{(1 + 0,59825 K_e)} \neq 0.$$

vagyis a 0-típusú zárt szabályozási rendszer az 1-típusú bemeneti jelet ( $p_c(s) = \frac{1}{s}$ ) valóban csak maradó hibával követi. A maradó hiba értéke állandósult állapotban tehát a következő lesz

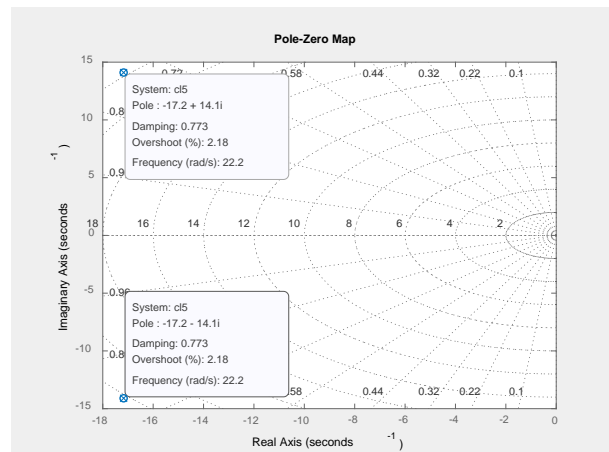
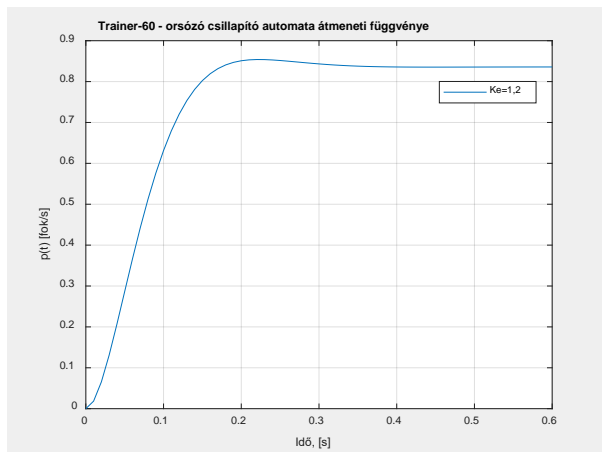
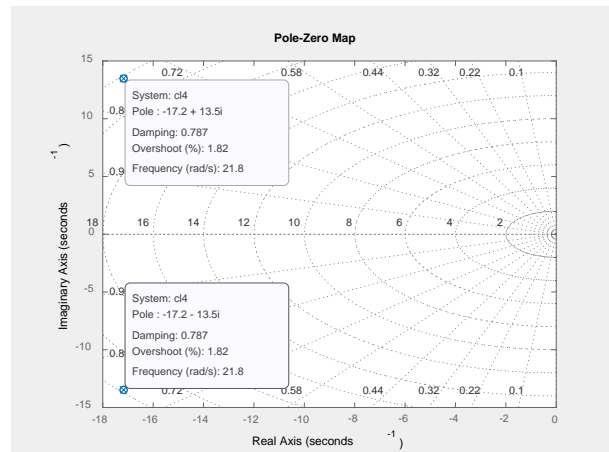
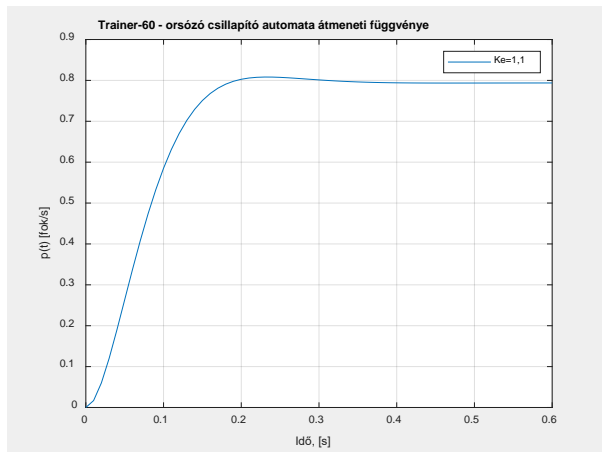
$$e(\infty) = p_c(\infty) - 0,5 \cdot p(\infty) = 1 - 0,5 \cdot \frac{1,1965 K_e}{(1 + 0,59825 K_e)} \neq 0.$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit, és minőségi jellemzőit  $K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2$  erősítési értékek mellett (5. ábra)



5. ábra: Átmeneti folyamatok és jellemzőik.



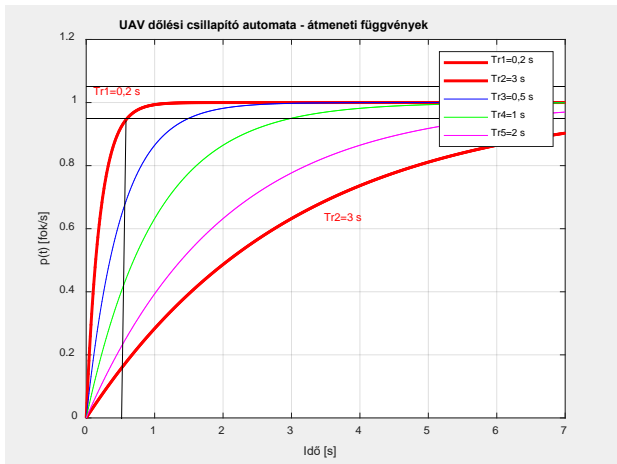


5. ábra: Átmeneti folyamatok és jellemzőik (Folyt.).

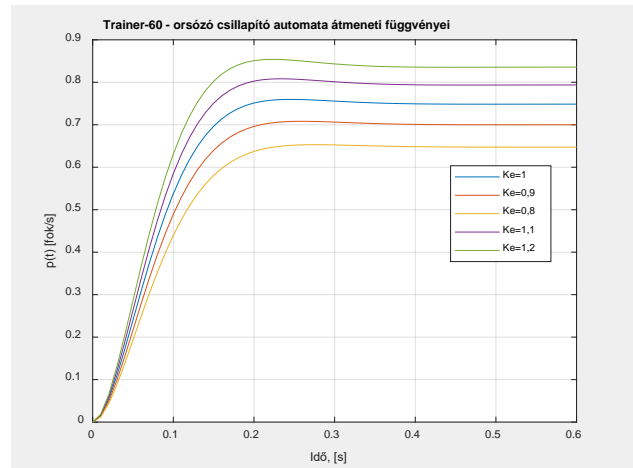
A fenti ábrák alapján foglaljuk össze a Trainer-60 UAV minőségi jellemzőit, melyeket az alábbi táblázatban látunk:

Erősítés, $K_e$	Pólusok, $p_i$	Csillapítási tényező, $\xi$ , [-]	Túllövés, $\sigma$ , [%]
1	$p_{1,2} = -17,2 \pm 12,8 \cdot i$	0,801	1,49
0,9	$p_{1,2} = -17,2 \pm 12,1 \cdot i$	0,817	1,17
0,8	$p_{1,2} = -17,2 \pm 11,4 \cdot i$	0,833	0,881
1,1	$p_{1,2} = -17,2 \pm 13,5 \cdot i$	0,787	1,82
1,2	$p_{1,2} = -17,2 \pm 14,1 \cdot i$	0,773	2,18

A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a 6. ábra segítségével végezzük el.



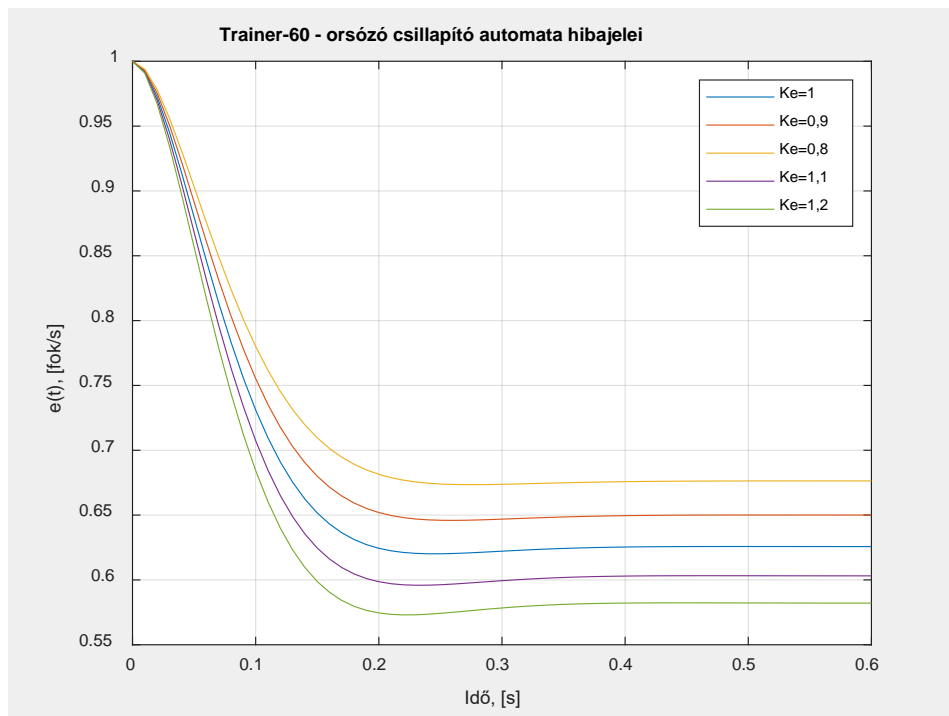
5.2. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



6. ábra: a Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A kapott új eredmények alapján elmondható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egységugrás bemeneti vizsgáló jelet. A maradó hiba értékét korábban már meghatároztuk, azok időfüggvényei a 7. ábrán láthatóak:

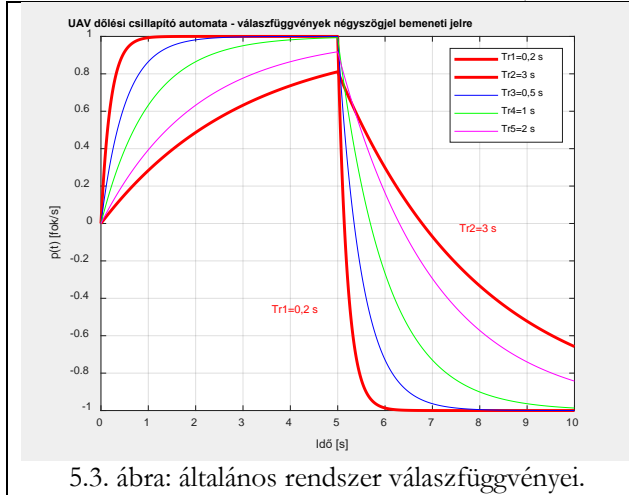


7. ábra. Hibajel időfüggvények.

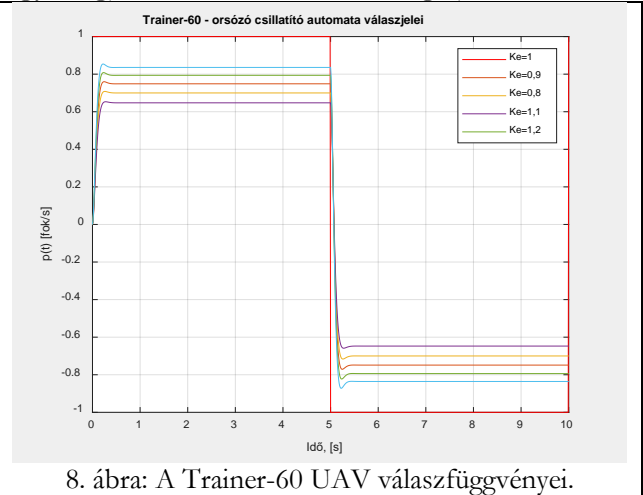
Tekintettel arra, hogy az orsózó csillapító automata képezi a dőlési szög stabilizáló rendszer belső hurokját, amely a 'dőlési szögsebesség – dőlési szög' kapcsolat miatt más 'típusú', így a dőlési szög stabilizáló rendszerek már képesek maradó hiba nélkül lekövetni az ugrásfüggvény-típusú bemeneti vizsgáló jelet.

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozó rendszerének átmeneti függvényei sokkal gyorsabban lecsengenek, mint az értekezésben bemutatott általános rendszer átmeneti függvényei;
- a Trainer-60 UAV  $K_e$  szabályozójának erősítését változtatva elmondhatjuk, hogy az erősítés növekedésével növekszik a  $\sigma$  túlszabályozás, és csökken a  $\xi$  csillapítási tényező; míg az erősítés csökkentésével csökken a  $\sigma$  túlszabályozás, és növekszik a  $\xi$  csillapítási tényező.

A Trainer-60 UAV-nak a bemeneti, előjel váltó négyszögjelre adott válaszait vizsgáljuk a 8. ábrán:



5.3. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



8. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A 8. ábra alapján megállapítható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egyes félperiódusokban az egységugrás bemeneti jelet;
- A Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere jóval gyorsabb, mint az értekezésben bemutatott, általános repülésszabályozó rendszer.

### Kérdés

- Az (5.19-5.21) átviteli függvények itt teljesen azonosak. Hogyan alakulnak ezek a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereit behelyettesítve?

**Válasz:** Az (5.19)-(5.21) átviteli függvények javított alakjai az alábbiak lesznek:

$$W_3(s) = \frac{p(s)}{\delta_A(s)} = \frac{A_p(s+1/T_{\beta_1})(s+1/T_{\beta_2})(s+1/T_{\beta_3})e^{-\tau_a s}}{(s^2+2\xi_{D_a}\omega_{D_a}s+\omega_{D_a}^2)(s+1/T_S)(s+1/T_R)}, \quad (5.19)$$

$$W_4(s) = \frac{\beta(s)}{\delta_R(s)} = \frac{A_\beta(s+1/T_{\beta_4})(s+1/T_{\beta_5})(s+1/T_{\beta_6})e^{-\tau_\beta s}}{(s^2+2\xi_{D_\beta}\omega_{D_\beta}s+\omega_{D_\beta}^2)(s+1/T_{S_\beta})(s+1/T_{R_\beta})}, \quad (5.20)$$

$$W_5(s) = \frac{r(s)}{\delta_R(s)} = \frac{A_r(s+1/T_{\beta_7})(s+1/T_{\beta_8})(s+1/T_{\beta_9})e^{-\tau_r s}}{(s^2+2\xi_{D_r}\omega_{D_r}s+\omega_{D_r}^2)(s+1/T_{S_r})(s+1/T_{R_r})}, \quad (5.21)$$

Tekintettel arra, hogy az értekezés a Trainer-60 UAV oldalirányú, rövidperiodikus mozgását vizsgálta, így az oldalirányú mozgás átviteli függvénye – holtidőmentes esetre – a következő alakban adható meg<sup>15,16</sup>:

$$W_3(s) \cong \frac{p(s)}{\delta_A(s)} = \frac{L_{\delta_a}}{s-L_p} = \frac{23,8289}{s+19,9149}, \text{ ahol: } L_{\delta_a} = \frac{\rho V_a^2}{2} S b C_{p\delta_a}; L_p = \Gamma_1 q^* + \frac{\rho V_a^2}{4} S b^2 C_{pp}.$$

<sup>15</sup> R. W. Beard, T. W. McLain: Small Unmanned Aircraft. Theory and Practice. Princeton University Press, 2012. ISBN 978-0-691-14921-9.

<sup>16</sup> D. McLean: Automatic Flight Control Systems. Prentice-Hall, Inc., 1990.

## Kérdés

- Az (5.26) egyenlet és az 5.4, 5.5 és 5.6 ábrák kapcsán ismét kérem a hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereinek használatát!

**Válasz:** Az értekezésben bemutatott hipotetikus UAV zárt szabályozási rendszer (5.26) egyenlete azt a korábban már részletesen is ismertetett célt szolgálta, hogy később kiindulási alap legyen egy adott UAV típus, egy adott robotpilóta üzemmódon, és az adott üzemképességi szinteknek is megfelelő minőségi követelményrendszer felállításához.

A Trainer-60 UAV oldalirányú mozgását az értekezés (7.1) állapot-egyenlete írja le:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,7724 & 0 & -18,9671 & 9,0867 \\ 1,9247 & -19,9149 & 7,7565 & 0 \\ 69,1314 & -23,8689 & -2,5966 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2,2582 \\ -23,8289 & 1,5015 \\ -11,7532 & -15,2855 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{bmatrix}, \quad (7.1)$$

ahol  $v$  az oldalirányú egyenes vonalú mozgás sebessége, [m/s];  $p$  az orsózó szögsebesség, [fok];  $r$  a legyező szögsebesség, [fok/s];  $\phi$  a dőlési szög, [fok];  $\delta_a$  a csűrőlapok szöghelyzet változása, [fok]; és végül,  $\delta_r$  az oldalkormány szöghelyzet változása, [fok].

A (7.1) egyenletből a legyező szögsebesség változását az alábbi differenciálegyenlet írja le:

$$\dot{r} = -2,5966 \cdot r - 15,2855 \cdot \delta_r.$$

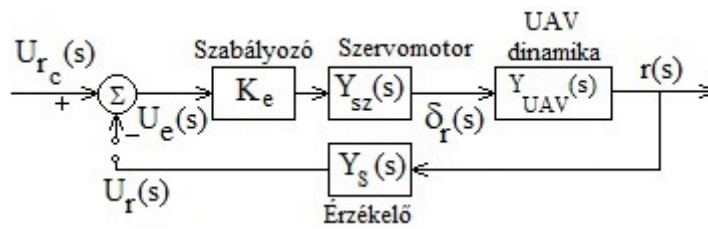
A fenti egyenlet zérus kezdeti feltételek mellett vett Laplace-transzformáltja a következő lesz:

$$sr(s) = -2,5966 \cdot r(s) - 15,2855 \cdot \delta_r(s).$$

A fenti egyenlet alapján a rövidperiodikus legyező mozgás átviteli függvénye – az egyenlet rendezése után – az alábbi alakban írható fel

$$Y(s) = \frac{r(s)}{-\delta_r(s)} = \frac{15,2855}{s+2,5966} \cong \frac{5,88674}{1+0,38512s}.$$

Az oldalkormány  $\delta_r$  szöghelyzetváltozásának (–) előjele olyan mérőirányt jelent, amikor a  $r(s)$  legyező szögsebesség változása pozitív előjelű lesz. A legyező csillapító automata hatásvázlata a 9. ábrán látható:



9. ábra: A Trainer-60 UAV legyező csillapító automatája.

A 9. ábrán:  $U_{rc}(s)$  az  $r_c(s)$  legyező szögsebesség referencia értékét reprezentáló villamos jel;  $U_r(s)$  az  $r(s)$  legyező szögsebesség pillanatnyi értékét reprezentáló villamos jel,  $U_e(s)$  az  $e(s)$  hibajel értékét reprezentáló villamos jel.

A 9. ábrán látható csillapító automata egyes elemeit az alábbi átviteli függvényekkel írjuk le:

$$K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; Y_{UAV}(s) = \frac{p(s)}{\delta_r(s)} = \frac{15,2855}{s+2,5966} \cong \frac{5,88674}{1+0,38512s}; Y_{sz}(s) = \frac{1}{1+0,0693s}; Y_s(s) = 0,5$$

A 9. ábrát az  $U_r(s)$  ellenőrző jel ágában felnyitva, a felnyitott szabályozási kör átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_F(s) = K_e Y_{SZ}(s) Y_{UAV}(s) Y_S(s) = K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{5,88674}{1+0,38512s} 0,5,$$

ami alapján megint csak megállapíthatjuk, hogy a legyező csillapító automata szabályozási rendszere 0-típusú, más szóval, nem tartalmaz integráló tagot. E típuszám alapján a zárt szabályozási rendszer alapjel követési tulajdonságai már előre jelezhetők<sup>17</sup>:

- a 0-típusú szabályozási rendszer a 0-típusú bemeneti vizsgáló jelet (Dirac-függvény) maradó hiba nélkül leköveti;
- a 0-típusú szabályozási rendszer az 1-típusú jelet (ugrásfüggvény) csak maradó hibával képes lekövetni;
- a 0-típusú rendszer a 2-, és magasabb típuszámú jeleket nem képes lekövetni.

A továbbiakban vizsgáljuk meg az értekezésben közreadott, általános zárt szabályozási rendszer, és a Trainer-60 UAV oldalirányú mozgása csillapító automatájának válaszfüggvényeit.

### I. A súlyfüggvények összehasonlítása.

Az alapjel követési tulajdonságok vizsgálatához határozzuk meg a 9. ábrán látható zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvényét, ami most a következő alakban írható fel:

$$W(s) = \frac{r(s)}{r_c(s)} = \frac{K_e Y_{SZ}(s) Y_{UAV}(s)}{1 + K_e Y_{SZ}(s) Y_{UAV}(s) Y_S(s)} = \frac{K_e \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{5,88674}{1+0,38512s}}{1 + K_e \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{5,88674}{1+0,38512s} 0,5} = \frac{5,88674 K_e}{(1+0,0693s) \cdot (1+0,38512s) + 5,88674 K_e} = \frac{5,88674 K_e}{0,02668882 \cdot s^2 + 0,45442 \cdot s + (1+2,94337 K_e)}$$

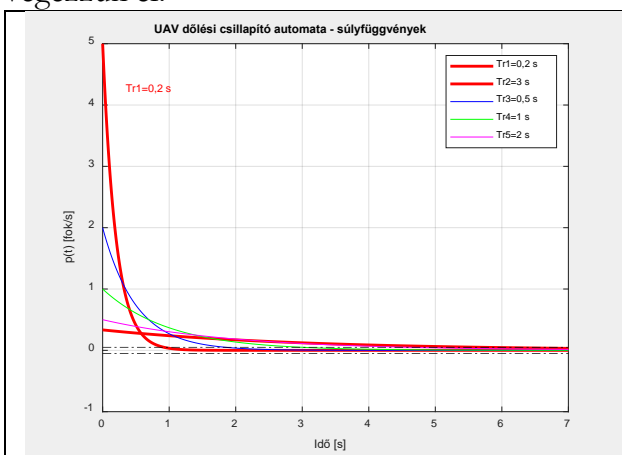
Az orsózó szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye:

$$p_c(t) = \delta(t) \rightarrow p_c(s) = 1.$$

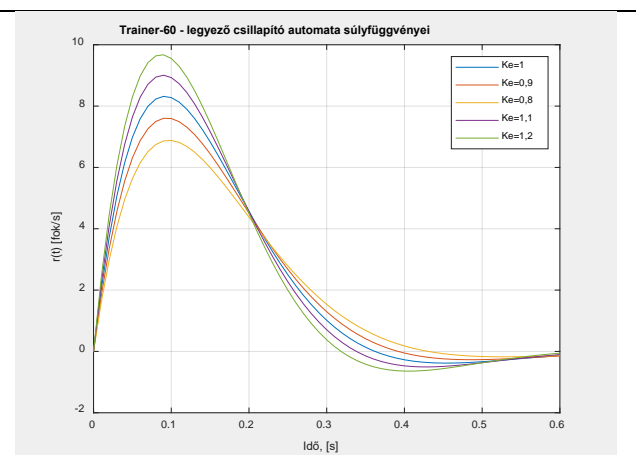
A vizsgált orsózó csillapító automata válaszfüggvényének végértéke:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s p(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) p_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{5,88674 K_e}{0,00410256 \cdot s^2 + 0,1285 \cdot s + (1+0,59825 K_e)} = 0,$$

vagyis, kellően nagy időkre UAV súlyfüggvényei visszatérnek a kezdeti zérus értékéhez. A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a lenti 10. ábra segítségével végezzük el.



5.1. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



10. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

<sup>17</sup> Csáki, F., Bars, R. Automatika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.

A kapott új eredmények alapján elmondhatjuk, hogy:

- mindkét rendszer, úgy az értekezésben közölt általános, mint a Trainer-60 UAV dinamikájának, és a zárt szabályozási rendszerének figyelembevételével meghatározott rendszer alapjel követő: a bemeneti  $p_c(t) = \delta(t)$  jelet maradó hiba nélkül leköveti: kellően nagy időkre a zárt szabályozási rendszer válaszfüggvénye visszatér a kezdeti, zérusértékű állapotába;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényeinek amplitúdója növekszik az értekezésben közöltekhez képest;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényei viszont jóval gyorsabban csillapodnak le, mint az értekezésben közölt zárt rendszer súlyfüggvényei;
- a Trainer-60 UAV  $K_e$  szabályozójának erősítését változtatva elmondhatjuk, hogy az erősítés növekedésével növekszik a válaszfüggvények maximális értéke, míg az erősítés csökkenése a függvénymaximumok csökkenéséhez vezet.

## II. Az átmeneti függvények összehasonlítása.

A legyező szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye most:

$$p_c(t) = 1(t) \rightarrow p_c(s) = \frac{1}{s}.$$

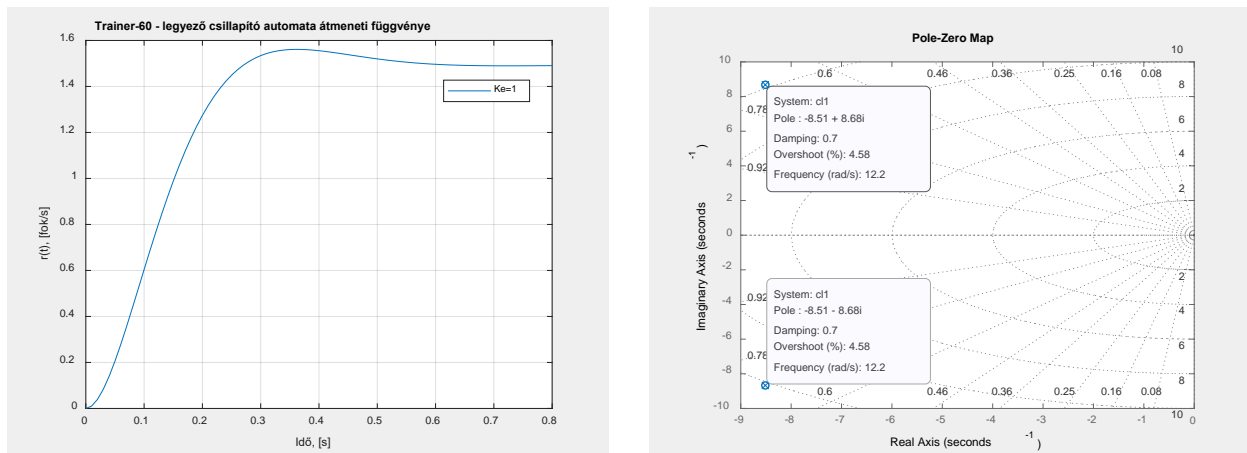
A vizsgált orsózó csillapító automata válaszfüggvényének végértéke:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) = p(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sp(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sW(s)p_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1,1965 K_e}{0,00410256 \cdot s^2 + 0,1285 \cdot s + (1 + 0,59825 K_e)} \frac{1}{s} = \frac{1,1965 K_e}{(1 + 0,59825 K_e)} \neq 0.$$

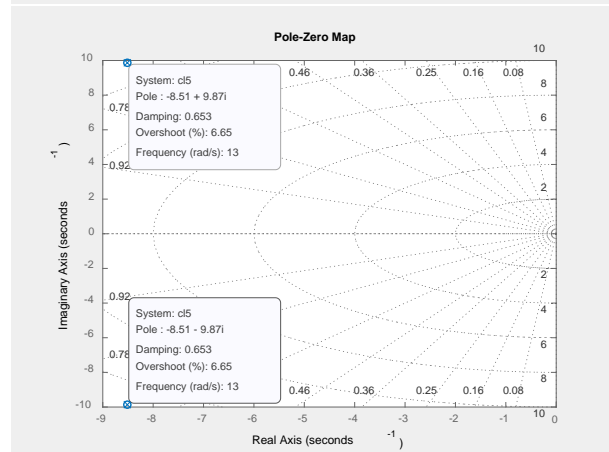
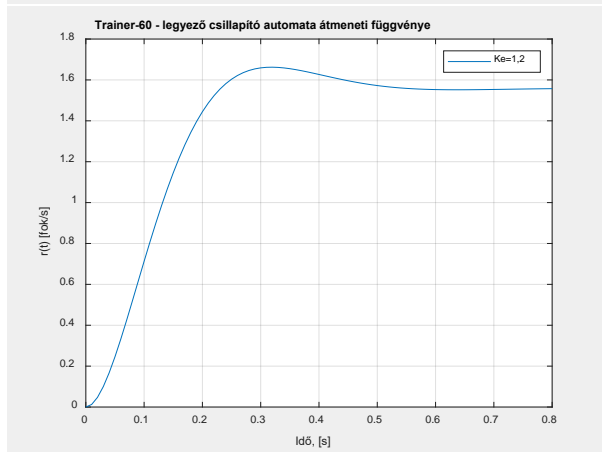
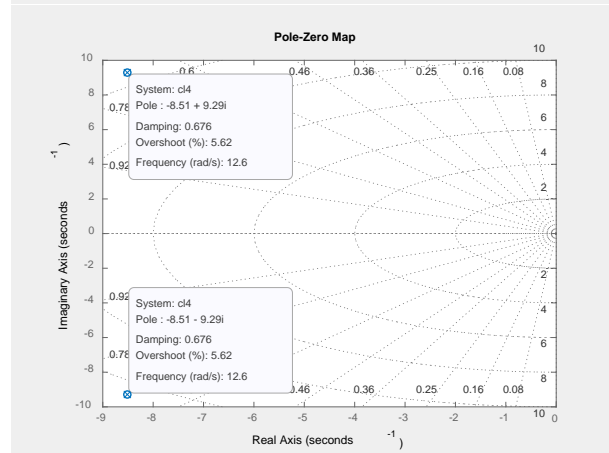
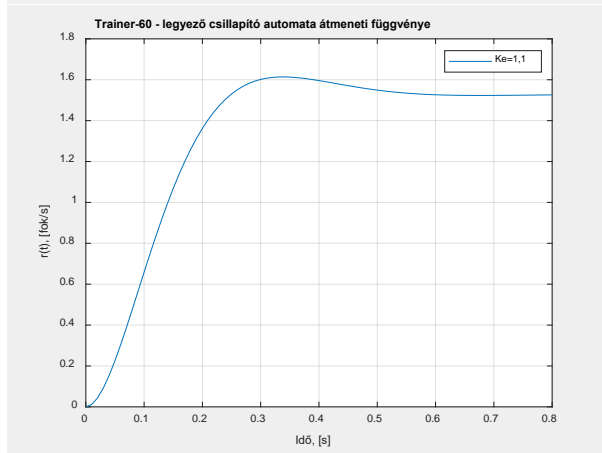
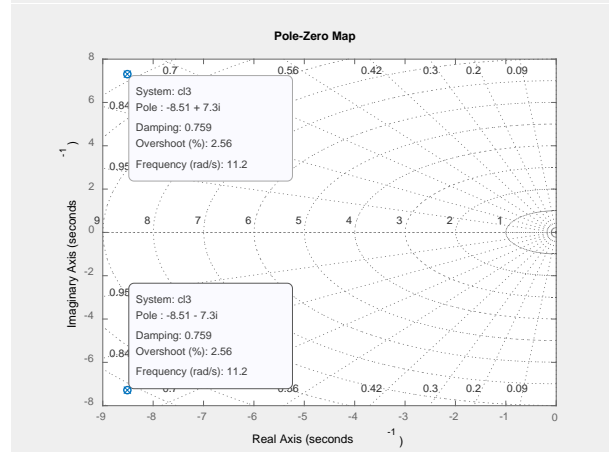
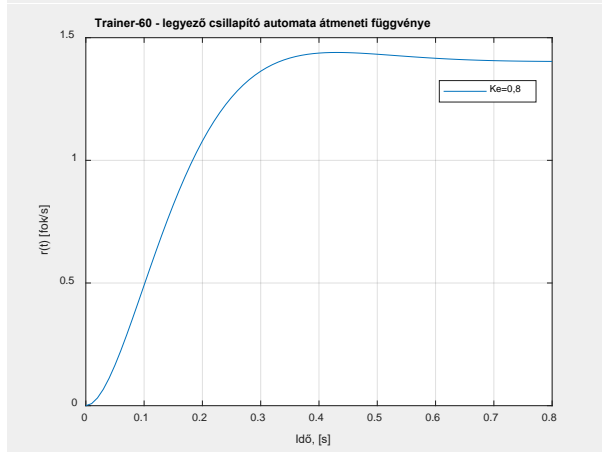
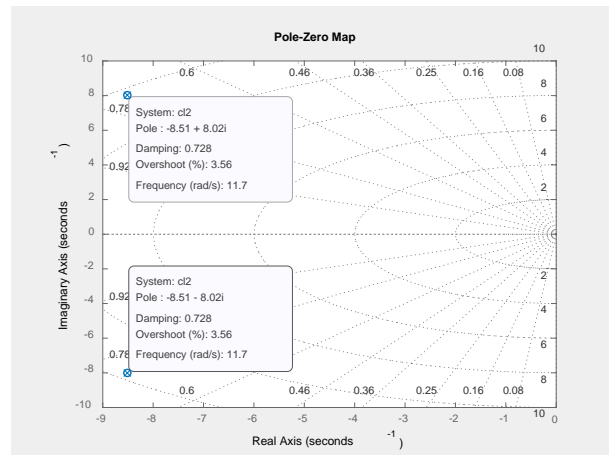
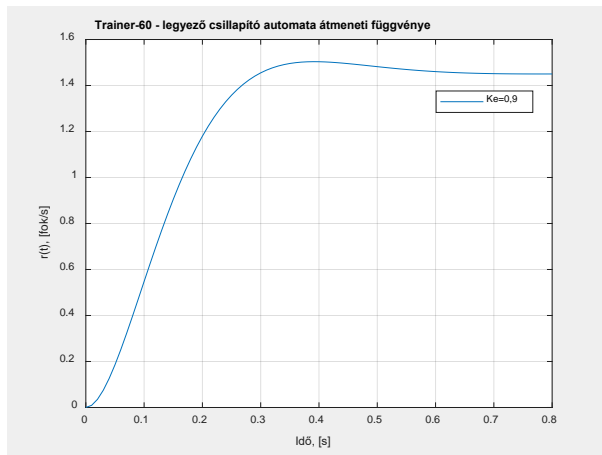
vagyis a 0-típusú zárt szabályozási rendszer az 1-típusú bemeneti jelet ( $p_c(s) = \frac{1}{s}$ ) valóban csak maradó hibával követi. A maradó hiba értéke:

$$e(\infty) = p_c(\infty) - 0,5p(\infty) = 1 - 0,5 \frac{1,1965 K_e}{(1 + 0,59825 K_e)} \neq 0.$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit, és dinamikus minőségi jellemzőit, a  $K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2$  erősítési értékek mellett. A számítógépes szimuláció eredményeit a 11. ábrán láthatjuk.



11. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei, és minőségi jellemzői.

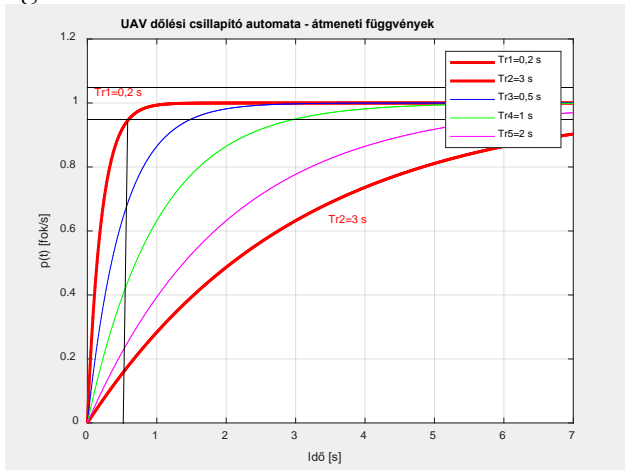


11. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei, és minőségi jellemzői (Folyt.)

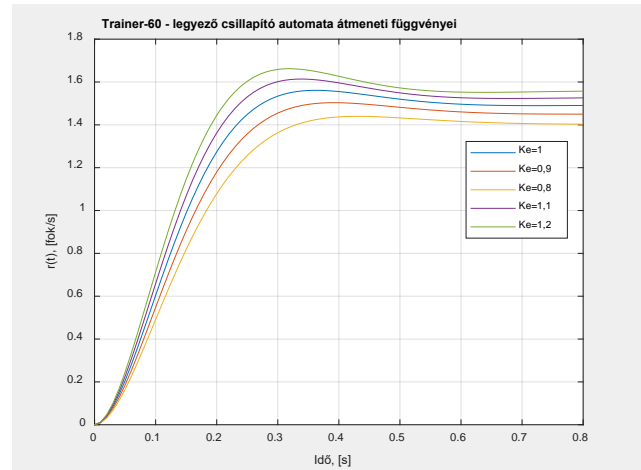
A 11. ábra alapján foglaljuk össze a Trainer-60 UAV minőségi jellemzőit, melyeket az alábbi táblázatban látunk:

Erősítés, $K_e$	Pólusok, $p_i$	Csillapítási tényező, $\xi$ , [-]	Túllövés, $\sigma$ , [%]
1	$p_{1,2} = -8,51 \pm 8,68 \cdot i$	0,7	4,58
0,9	$p_{1,2} = -8,51 \pm 8,02 \cdot i$	0,728	3,58
0,8	$p_{1,2} = -8,51 \pm 7,3 \cdot i$	0,759	2,56
1,1	$p_{1,2} = -8,51 \pm 9,29 \cdot i$	0,676	5,62
1,2	$p_{1,2} = -8,51 \pm 9,87 \cdot i$	0,653	6,65

A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a 12. ábra segítségével végezzük el.



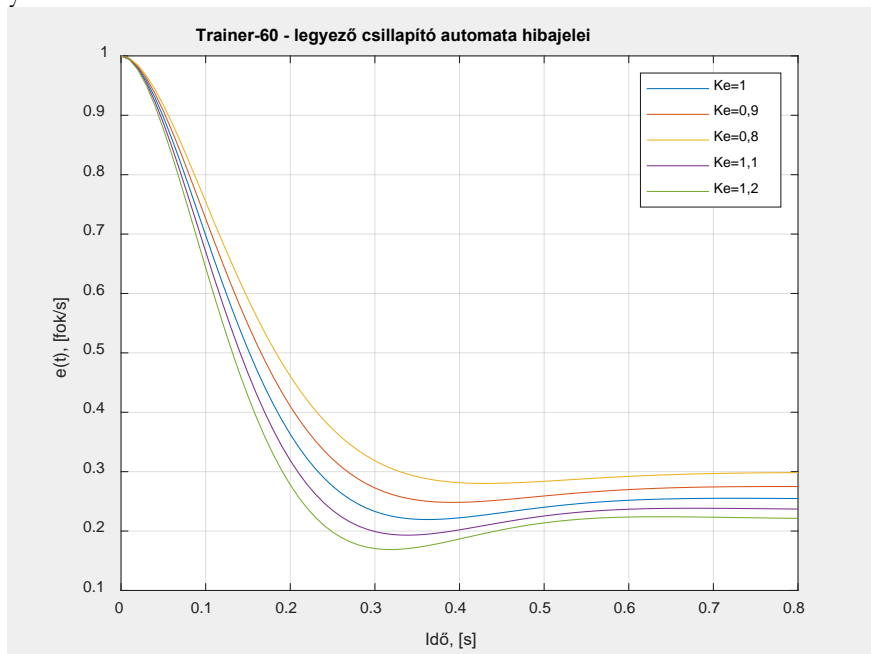
5.2. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



12. ábra: a Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A kapott új eredmények alapján elmondható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egységugrás bemeneti vizsgáló jelet. A maradó hiba értékét korábban ár meghatároztuk, azok időfüggvényei a 13. ábrán láthatóak:



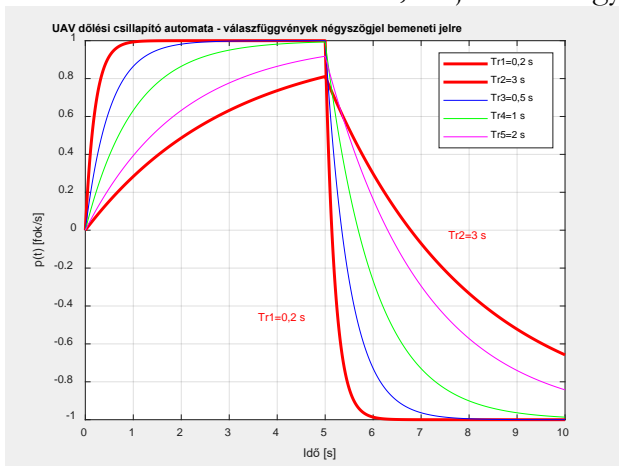
13. ábra. Hibajel időfüggvények.



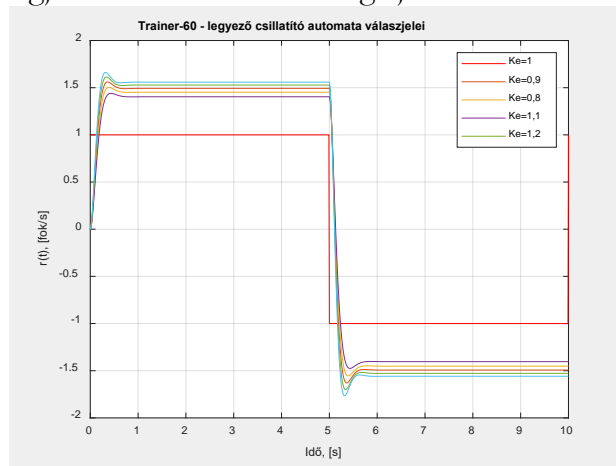
Tekintettel arra, hogy a legyező csillapító automata képezi az irányszög stabilizáló rendszer belső hurokját, amely a 'legyező szögsebesség – irányszög' közötti integráló kapcsolat miatt 1-típusú, így az irányszög stabilizáló rendszerek már képesek maradó hiba nélkül lekövetni az ugrásfüggvény-típusú bemeneti vizsgáló jelet.

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozó rendszerének átmeneti függvényei sokkal gyorsabban lecsengenek, mint az értekezésben bemutatott általános rendszer átmeneti függvényei;
- a Trainer-60 UAV  $K_e$  szabályozójának erősítését változtatva elmondhatjuk, hogy az erősítés növekedésével növekszik a  $\sigma$  túlszabályozás, és csökken a  $\xi$  csillapítási tényező; míg az erősítés csökkentésével csökken a  $\sigma$  túlszabályozás, és növekszik a  $\xi$  csillapítási tényező.

A Trainer-60 UAV a bemeneti, előjelváltó négyszögjelre adott válaszait vizsgáljuk a 14. ábrán:



5.3. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



14. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A 14. ábra alapján megállapítható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egyes félperiódusokban az egységugrás bemeneti jelet;
- A Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere jóval gyorsabb, mint az értekezésben bemutatott, általános repülésszabályozó rendszer.

## Kérdés

- 105. oldal: "Megemlítjük, hogy ellentétben a személyzet által a fedélzetről irányított légijárművekkel, ahol a phugoid pályalengésekkel nem számolnak, mert annak kialakulását csillapító automata megelőzi, az UAVk esetén, véleményem szerint e mozgásfajtaival számolni kell a repülésszabályozás által esetlegesen nem kezelt folyamatok miatt." Van ennek az állításnak repülési adatokou, vagy szakirodalmon alapuló alátámasztása? Mi indokolja, hogy az (5.29) és (5.30) egyenletekben mégis csak a rövid periódusú mozgást veszi figyelembe?

**Válasz:** A légijárművek térbeli mozgásának vizsgálata során az első fázisában a rövidperiodikus, nagyfrekvenciás folyamatokat szokás vizsgálni, amelyek gyorsan csengenek le, és amelyek az idő előre haladtával akár átválthatnak fugoid (hosszúperiodikus, kisfrekvenciás mozgás) pályalengésbe<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> D. McLean: Automatic Flight Control Systems. Prentice-Hall, 1990.

F. W. Lanchester részletesen foglalkozott a hosszirányú mozgás negyedrendű karakterisztikus polinomjának alakjával, és azt állapította meg, hogy a légi járművek többségére igaz, hogy a  $|\lambda I - A| = 0$ , vagy zérus kezdeti feltételek mellett a Laplace-transzformált:  $|sI - A| = 0$  – ahol  $I$  (4\*4) méretű identitásmátrix, és  $A$  (4\*4) méretű állapot-mátrix – alakú karakterisztikus egyenletet megoldva, rendszerint két másodfokú '  $\lambda$ ', vagy '  $s$ ' polinom szorzatát kapjuk:

$$(\lambda^2 + 2\xi_{rp}\omega_{rp}\lambda + \omega_{rp}^2)(\lambda^2 + 2\xi_f\omega_f\lambda + \omega_f^2) = 0, \text{ vagy } (s^2 + 2\xi_{rp}\omega_{rp}s + \omega_{rp}^2)(s^2 + 2\xi_f\omega_f s + \omega_f^2) = 0$$

ahol az '  $rp$ ' alsó index a 'rövidperiodikus', míg az '  $f$ ' index a 'fugoid' kifejezést jelenti.

A fugoid mozgás rendszerint alul csillapított, hosszúperiodikus és kisfrekvenciás, ezért sokszor az utazási komfort biztosítása miatt nem célszerű megengedni ezt a mozgásfajtát: akár a hajózó személyzet, vagy a bekapcsolt robotpilóta is kellően gyors beavatkozásokkal csillapíthatják ezt a sokszor nemkívánatos mozgásfajtát, ami akár még instabil rendszerválaszt is jelenthet.

Ha például a SUAV-oknak az Euler-szögek stabilizálását (rövidperiodikus, nagyfrekvenciás mozgás) szeretnénk vizsgálni, és arra minőségi követelményeket megadni, akkor olyan mozgását szeretnénk vizsgálni, amelyik mentes a fugoid pályalengésektől: az UAV gyorsan változtatja meg a térbeli helyzetét, és tér át az új egyensúlyi helyzetébe.

D. McLean szerint az is előfordulhat, hogy a  $(s^2 + 2\xi_f\omega_f s + \omega_f^2)$  másodrendű polinom – kritikus  $\xi_f = 1$  csillapításérték esetén – egytárolós tagok  $(s + p_1)(s + p_2)$  szorzataként írható fel, ahol  $\omega_f^2 = p_1 p_2$ , és  $p_1 + p_2 = 2\xi_f\omega_f$ .

Mindezek alapján választottam ki az UAVk rövidperiodikus mozgását, és azok egyenleteit a vizsgálataimhoz, mert az UAV térbeli szöghelyzetét irányító robotpilóták esetében, véleményem szerint, a rövidperiodikus mozgások megfelelőek arra, hogy megfelelően írják le az UAVk mozgását.

## Kérdés

– Az (5.32) egyenlet és az 5.7, 5.8 és 5.9 ábrák kapcsán ismét kérem a hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereinek használatát!

**Válasz:** Az értekezésben bemutatott hipotetikus UAV zárt szabályozási rendszer (5.31)-(5.32) egyenletei azt a korábban már részletesen is ismertetett célt szolgálták, hogy később kiindulási alapként alkalmasak legyenek, egy adott osztályhoz tartozó UAV típus, egy adott robotpilóta üzemmódon, egy adott repülési fázisára vonatkozó, és a légi jármű egy adott üzemképességi szintjének is megfelelő minőségi követelményrendszer felállításához.

A Trainer-60 UAV hosszirányú, rövidperiodikus mozgását az értekezés (7.50) állapot-egyenlete írja le<sup>19</sup>:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,9966 & 19 \\ -3,9794 & -12,991 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1,2965 \\ -18,7890 \end{bmatrix} \delta_e \quad (7.50)$$

ahol  $w$  a függőleges sebesség, [m/s],  $q$  a bólintó szögsebesség, [fok/s], és  $\delta_e$  a magassági kormány szöghelyzet változása, [fok].

A (7.50) egyenletből a bólintási szögsebesség változását az alábbi differenciálegyenlet írja le:

$$\dot{q} = -12,991 \cdot q - 18,789 \cdot \delta_e.$$

A fenti egyenlet zérus kezdeti feltételek mellett vett Laplace-transzformáltja a következő lesz:

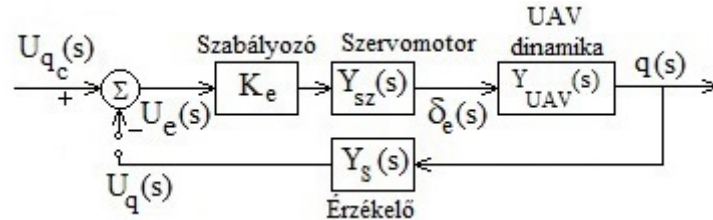
$$sq(s) = -12,991 \cdot q(s) - 18,789 \cdot \delta_e(s).$$

<sup>19</sup> Eng, P. C. S. *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing*. PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2011.

A fenti egyenlet alapján a rövidperiodikus bólintó mozgás átviteli függvénye – az egyenlet rendezése után – az alábbi alakban írható fel

$$Y(s) = \frac{q(s)}{-\delta_e(s)} = \frac{18,789}{s+12,991} \cong \frac{1,44631}{1+0,076976s}$$

A magassági kormány  $\delta_e$  szöghelyzetváltozásának (-) előjele olyan mérőirányt jelent, amikor a  $q(s)$  bólintó szögsebesség változása pozitív előjelű lesz. A bólintó csillapító automata hatásvázlata a 15. ábrán látható:



15. ábra: A Trainer-60 UAV bólintó csillapító automatájának hatásvázlata.

A 15. ábrán:  $U_{q_c}(s)$  a  $q_c(s)$  bólintó szögsebesség referencia értékét reprezentáló villamos jel;  $U_q(s)$  a  $q(s)$  bólintó szögsebesség pillanatnyi értékét reprezentáló villamos jel,  $U_e(s)$  az  $e(s)$  hibajel értékét reprezentáló villamos jel. A 15. ábrán látható bólintó csillapító automata egyes elemeit az alábbi átviteli függvényekkel írjuk le:

$$K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; Y_{UAV}(s) = \frac{q(s)}{-\delta_e(s)} = \frac{18,789}{s+12,991} \cong \frac{1,44631}{1+0,076976s}; Y_{sz}(s) = \frac{1}{1+0,0693s}; Y_s(s) = 0,5$$

A 15. ábrát az  $U_q(s)$  ellenőrző jel ágában felnyitva, a felnyitott szabályozási kör átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_F(s) = K_e Y_{sz}(s) Y_{UAV}(s) Y_s(s) = K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,44631}{1+0,076976s} \cdot 0,5,$$

ami alapján megállapíthatjuk, hogy a bólintó csillapító automata szabályozási rendszere 0-típusú, tehát nem tartalmaz integráló tagot. E típuszám alapján a zárt szabályozási rendszer alapjel követési tulajdonságai már előre jelezhetőek<sup>20</sup>:

- a 0-típusú szabályozási rendszer a 0-típusú bemeneti vizsgáló jelet (Dirac-függvény) maradó hiba nélkül leköveti;
- a 0-típusú szabályozási rendszer az 1-típusú jelet (ugrásfüggvény) csak maradó hibával képes lekövetni;
- a 0-típusú rendszer a 2-, és magasabb típuszámú jeleket nem képes lekövetni.

A továbbiakban vizsgáljuk meg az értekezésben közreadott, általános zárt szabályozási rendszer, és a Trainer-60 UAV hosszirányú mozgása csillapító automatájának válaszfüggvényeit.

### I. A súlyfüggvények összehasonlítása.

Az alapjel követési tulajdonságok vizsgálatához határozzuk meg a 15. ábrán látható zárt szabályozási rendszer  $q_c(s)$  alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvényét, ami most a következő alakban írható fel:

$$W(s) = \frac{q(s)}{q_c(s)} = \frac{K_e Y_{sz}(s) Y_{UAV}(s)}{1 + K_e Y_{sz}(s) Y_{UAV}(s) Y_s(s)} = \frac{K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,44631}{1+0,076976s}}{1 + K_e \cdot \frac{1}{1+0,0693s} \cdot \frac{1,44631}{1+0,076976s} \cdot 0,5} = \frac{1,44631 K_e}{(1+0,0693s) \cdot (1+0,076976s) + 0,723155 K_e} = \frac{1,44631 K_e}{0,005334436 \cdot s^2 + 0,146276 \cdot s + (1+0,723155 \cdot K_e)}$$

<sup>20</sup> Csáki, F., Bars, R. Automatika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.

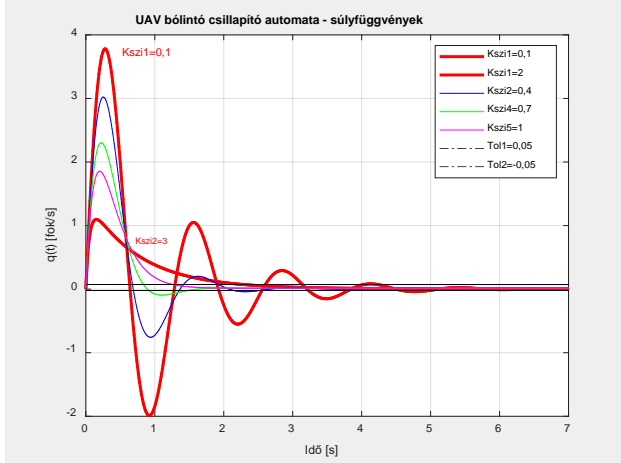
A bólintó szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye:

$$q_c(t) = \delta(t) \rightarrow q_c(s) = 1.$$

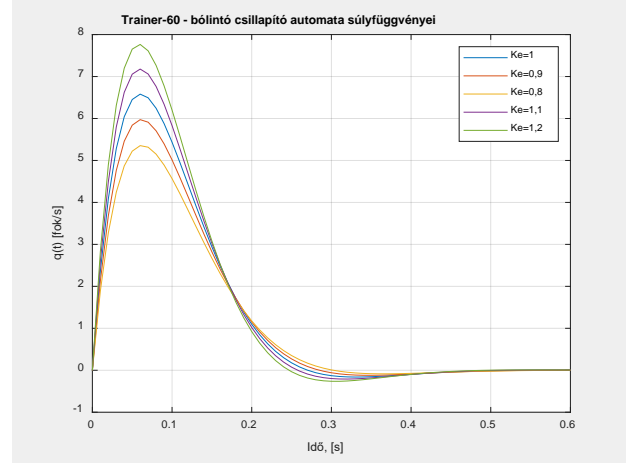
A vizsgált bólintó csillapító automata válaszfüggvényének végértéke:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s q(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) q_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1,44631 K_e}{0,005334436 \cdot s^2 + 0,146276 \cdot s + (1 + 0,723155 \cdot K_e)} = 0,$$

vagyis, kellően nagy időkre az UAV súlyfüggvényei visszatérnek a kezdeti zérus értékhez. A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a 16. ábra segítségével végezzük el.



5.7. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



16. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A kapott új eredmények alapján elmondhatjuk, hogy:

- mindkét rendszer, úgy az értekezésben közölt általános, mint a Trainer-60 UAV dinamikájának, és a zárt szabályozási rendszerének figyelembevételével meghatározott rendszer alapjel követő: a bemeneti  $q_c(t) = \delta(t)$  jelet maradó hiba nélkül leköveti: kellően nagy időkre a zárt szabályozási rendszer válaszfüggvénye, a súlyfüggvény visszatér a kezdeti, zérusértékű állapotába;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényeinek amplitúdója növekszik az értekezésben közöltekhöz képest;
- a Trainer-60 UAV súlyfüggvényei viszont jóval gyorsabban csillapodnak le, mint az értekezésben közölt zárt rendszer súlyfüggvényei;
- a Trainer-60 UAV  $K_e$  szabályozójának erősítését változtatva elmondhatjuk, hogy az erősítés növekedésével növekszik a válaszfüggvények maximális értéke, míg az erősítés csökkenése a függvénymaximumok csökkenéséhez vezet.

## II. Az átmeneti függvények összehasonlítása.

A bólintó szögsebesség zárt rendszerének bemeneti függvénye most a következő lesz:

$$q_c(t) = 1(t) \rightarrow q_c(s) = \frac{1}{s}.$$

A bólintó csillapító automata válaszfüggvényének végértéke:

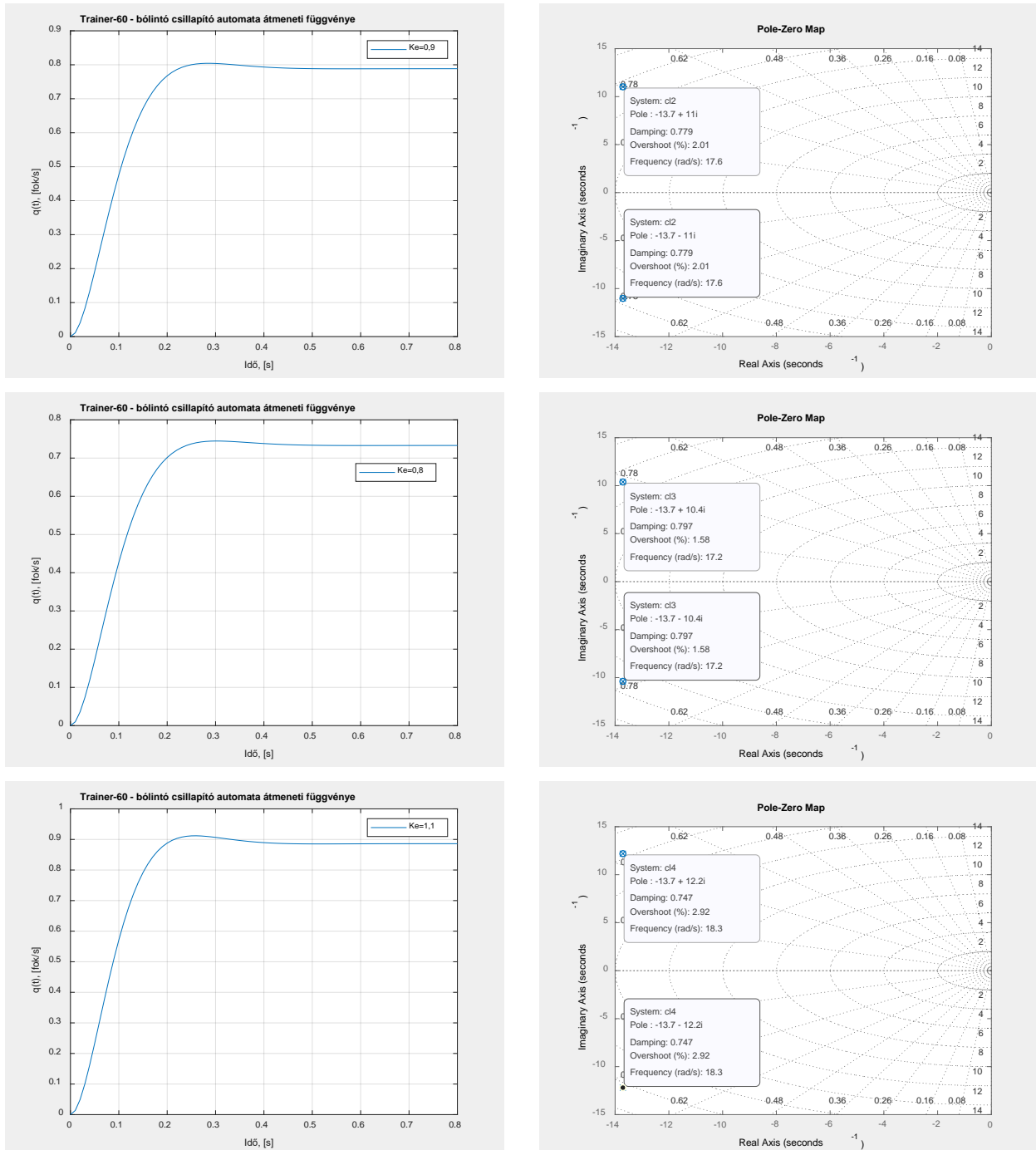
$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s q(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s W(s) q_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1,44631 K_e}{0,005334436 \cdot s^2 + 0,146276 \cdot s + (1 + 0,723155 \cdot K_e)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1,44631 \cdot K_e}{(1 + 0,723155 \cdot K_e)} \neq 0.$$

vagyis a 0-típusú zárt szabályozási rendszer az 1-típusú bemeneti jelet ( $q_c(s) = \frac{1}{s}$ ) valóban csak maradó hibával képes lekövetni.

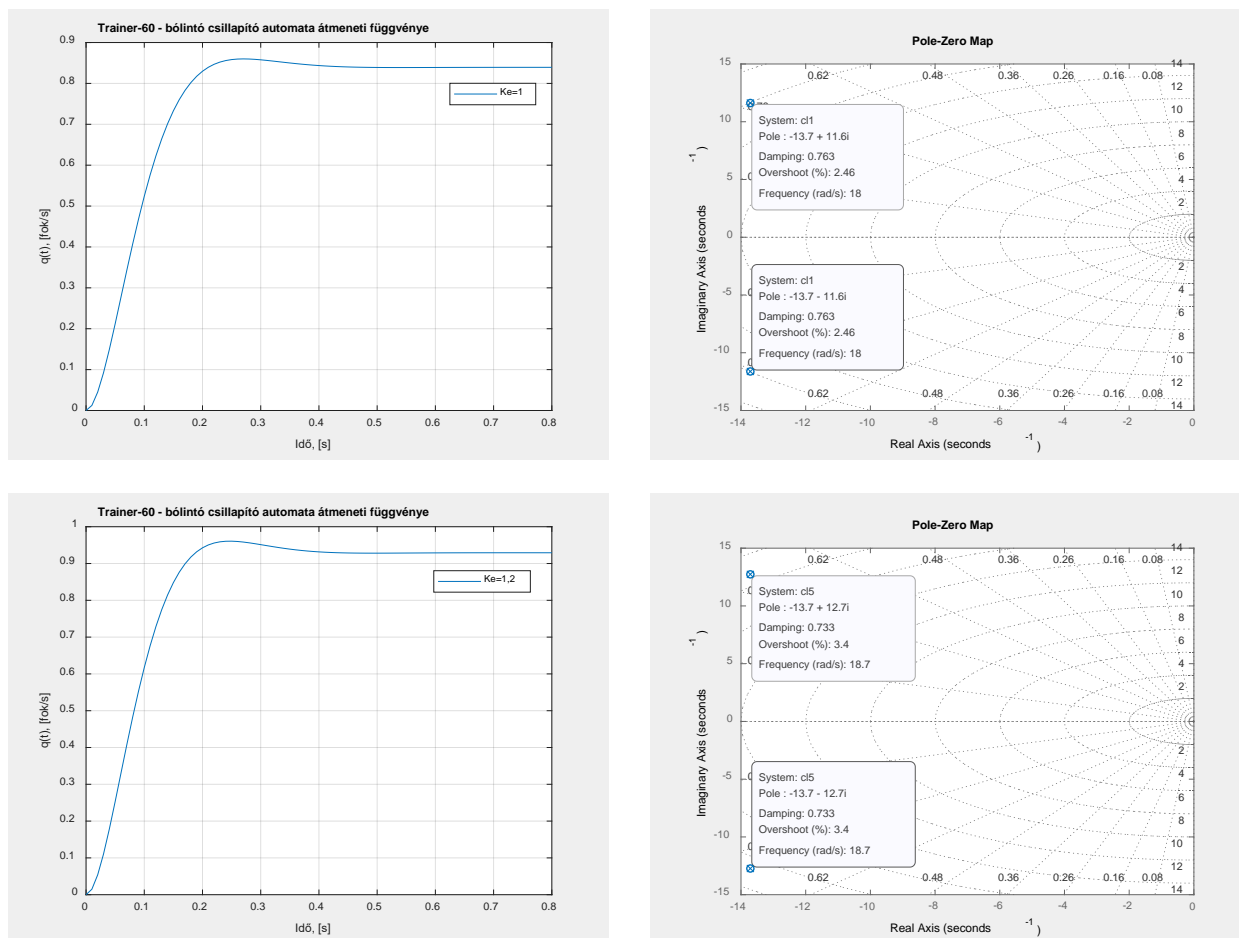
A maradó hiba értéke:

$$e(\infty) = q_c(\infty) - 0,5q(\infty) = 1 - 0,5 \frac{1,44631 \cdot K_e}{(1+0,723155 \cdot K_e)} \neq 0.$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit, és dinamikus minőségi jellemzőit, különféle  $K_e = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2$  erősítési értékek mellett. A számítógépes szimuláció eredményeit a 17. ábrán láthatjuk.



17. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei, és minőségi jellemzői.



17. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei, és minőségi jellemzői (Folyt.)

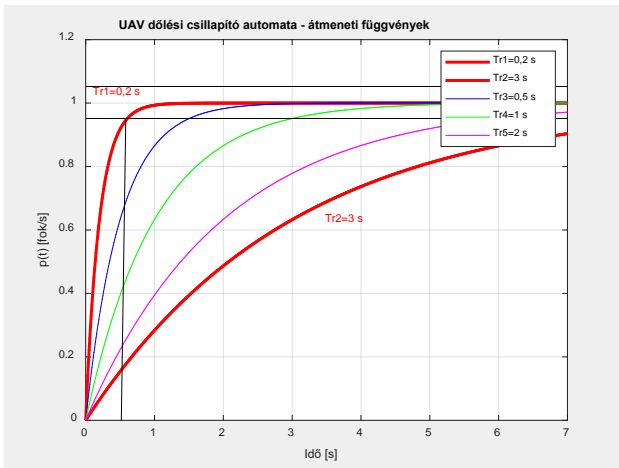
A 17. ábra alapján foglaljuk össze a Trainer-60 UAV bólintó csillapító automatájának minőségi jellemzőit, melyeket az alábbi táblázatban látunk:

Erősítés, $K_e$	Pólusok, $p_i$	Csillapítási tényező, $\xi$ , [-]	Túllövés, $\sigma$ , [%]
1	$p_{1,2} = -13,7 \pm 11,6 \cdot i$	0,763	2,46
0,9	$p_{1,2} = -13,7 \pm 11 \cdot i$	0,779	2,01
0,8	$p_{1,2} = -13,7 \pm 10,4 \cdot i$	0,797	1,58
1,1	$p_{1,2} = -13,7 \pm 12,2 \cdot i$	0,747	2,92
1,2	$p_{1,2} = -13,7 \pm 12,7 \cdot i$	0,733	3,4

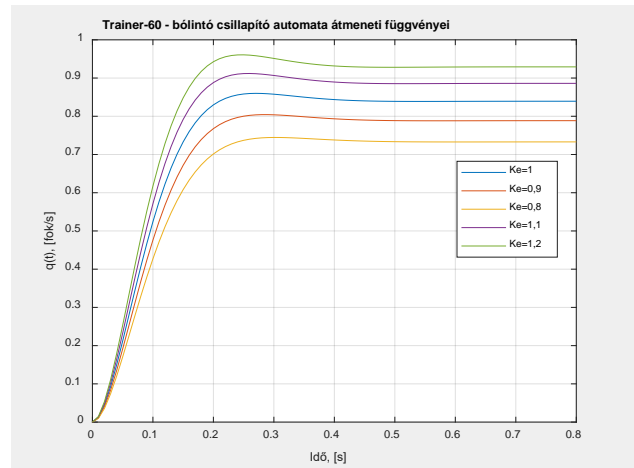
A zárt szabályozási rendszerek válaszfüggvényeinek összehasonlítását a 18. ábra segítségével végezzük el.

A kapott új eredmények (18. ábra) alapján elmondható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egységugrás bemeneti vizsgáló jelet;
- a soros szabályozó  $K_e$  erősítésének növeléskor növekszik a bólintó szögsebesség  $q(t)$  stacioner értéke, valamint csökken a csillapítási tényező  $\xi$ , és növekszik a túllövés  $\sigma$ .
- a soros szabályozó  $K_e$  erősítésének csökkentésekor csökken a bólintó szögsebesség  $q(t)$  stacioner értéke, valamint növekszik a csillapítási tényező  $\xi$ , és csökken a túllövés  $\sigma$ .

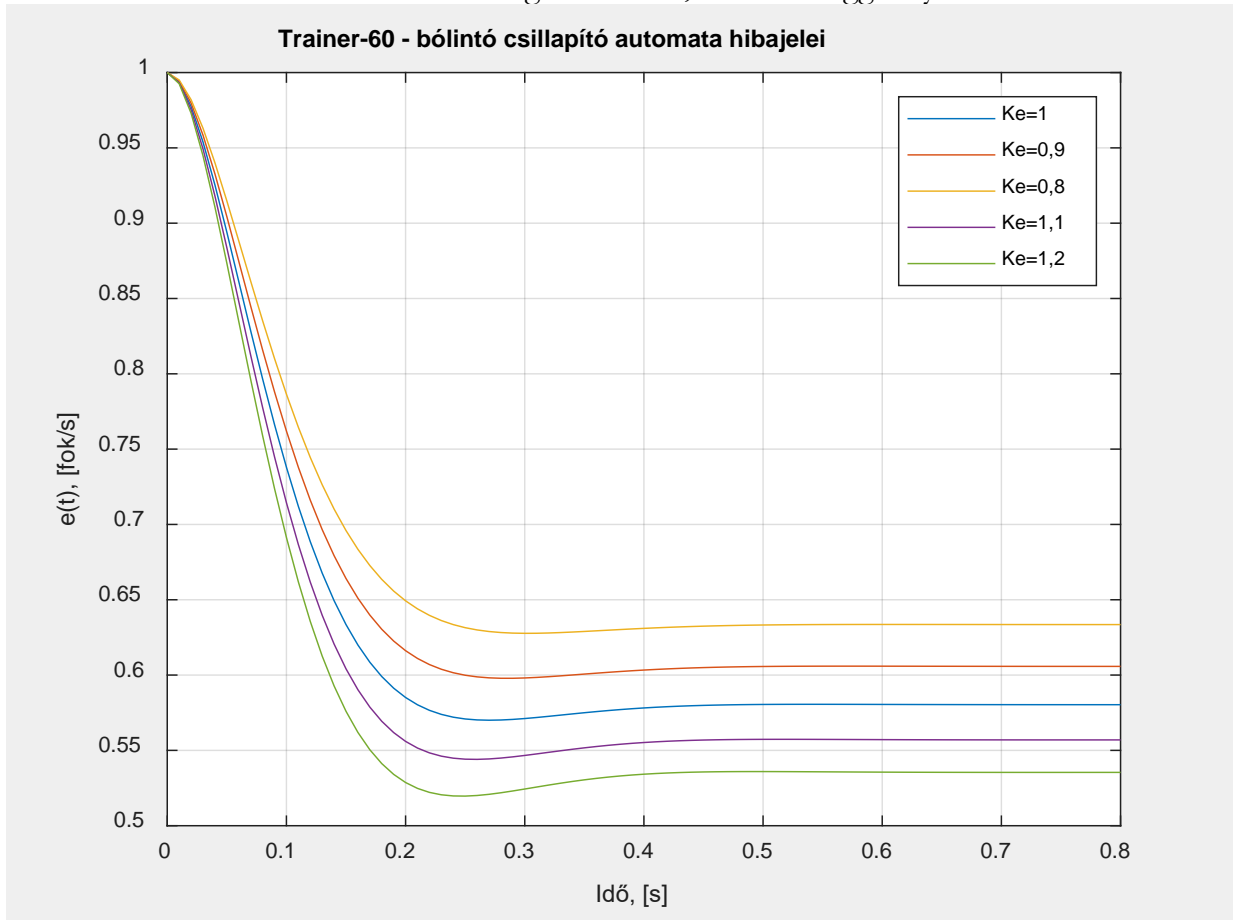


5.2. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



18. ábra: a Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

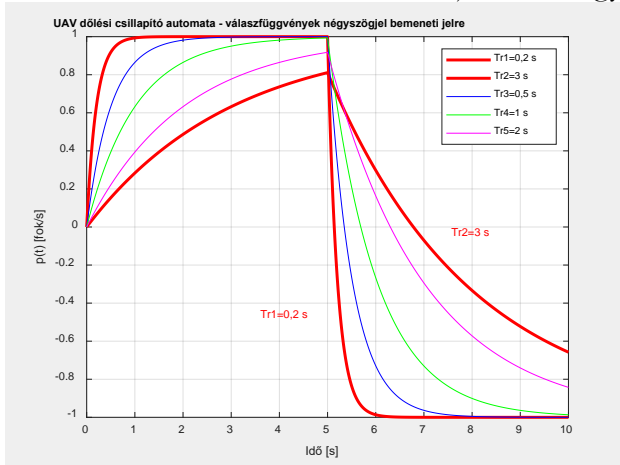
A maradó hiba értékét korábban már meghatároztuk, azok időfüggvényei a 19. ábrán láthatóak:



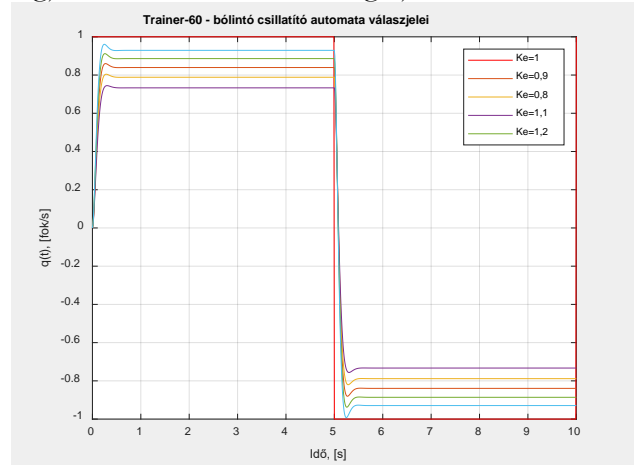
19. ábra. Hibajel időfüggvények.

Tekintettel arra, hogy a legyező csillapító automata képezi az irányszög stabilizáló rendszer belső hurokját, amely a 'legyező szögsebesség – irányszög' közötti integráló kapcsolat miatt 1-típusú, így az irányszög stabilizáló rendszerek már képesek maradó hiba nélkül lekövetni az ugrásfüggvény-típusú bemeneti vizsgáló jelet.

A Trainer-60 UAV a bemeneti, előjelváltó négyszögjelre adott válaszait vizsgáljuk a 20. ábrán.



5.3. ábra: általános rendszer válaszfüggvényei.



20. ábra: A Trainer-60 UAV válaszfüggvényei.

A 20. ábra alapján megállapítható, hogy:

- a Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere csak maradó hibával képes követni az egyes félperiódusokban az egységugrás bemeneti jelet;
- A Trainer-60 UAV zárt szabályozási rendszere jóval gyorsabb, mint az értekezésben bemutatott, általános repülésszabályozó rendszer.

### Kérdés

– A 118. oldalon az 5), 6), 7) és 8) pontokhoz kapcsolódva kérem, hogy tegye meg a  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$ ,  $\mu$  és MPC tervezési módszerek pár mondatos jellemzését, előnyeik és hátrányaik kiemelését ahogy a többi módszernél is megtette!

**Válasz:** a kérdésben szereplő tervezési módszerek rövid jellemzése<sup>21</sup>:

- 1)  $H_2$ LQG-módszer: optimális  $H_2$ -szabályozó tervezése frekvenciatartományban. A módszer jól alkalmazható, ha a szabályozott szakasz külső zavarásoknak és belső zajoknak van kitéve, és ezek a sztochasztikus jelek stacionáriusok és független fehér zaj függvények. A módszer lehetővé tesz, hogy a valós fizikai környezetben működő, fizikai rendszerek szabályozóit megtervezzük, amikor nem minden állapotváltozó mérhető, vagy egyéb okoknál fogva nem mért, így a nem rendelkezésre álló állapotváltozókat becsülni szükséges.
- 2)  $H_\infty$ -módszer: optimális  $H_\infty$ -szabályozó tervezése időtartományban. A módszer jól használható, ha ez egyes állapotváltozók között lényeges keresztkapcsolatok, és hatások figyelhetők meg, ami a légi járműveknek is az egyik tipikus tulajdonsága.
- 3)  $\mu$ -szintézis: paraméterbizonytalanságokkal rendelkező zárt szabályozási rendszerek optimális szabályozóinak tervezése. A zárt szabályozási rendszer egy-, de akár többváltozós is. A szabályozótervezés során e módszer segíti és lehetővé teszi úgy az additív, mint a multiplikatív, nemstrukturált paraméterbizonytalanságok figyelembe vételét.
- 4) MPC-módszer: prediktív jelkövető zárt szabályozási rendszer szabályozójának tervezése. A módszer előnye, hogy explicit módon kezeli a korlátokat és használja a rendszermodelleket. A módszer alapját képező optimálási feladat jól ismert, régóta használt, főleg az iparban sok

<sup>21</sup> Dr. Bokor József, Dr. Gáspár Péter, Dr. Szabó Zoltán: Irányításelmélet. BME MOGI, ISBN 978-963-313-175-6, 2014. <https://mogi.bme.hu/TAMOP/iranyitaselmélet/index.html> . letöltve: 2024. 10. 24.



tapasztalat gyűlt össze a módszer alkalmazásával illetően. E módszer lényeges gyorsabb, mint a szabályozótervezés során használt egyéb más, fejlett számítógépes módszerek. A rendszerdinamika vagy a minőségi követelmények esetleges megváltozása nem feltétlenül kívánja meg a rendszerek teljes újra tervezését<sup>22</sup>.

## Kérdés

– A (7.1) és a következő modellekben az állapotok és bemenetek mértékegységei mik?

**Válasz:** A (7.1) egyenlet a Trainer-60 SUAV oldalirányú mozgásának identifikált modelljét adja meg:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,7724 & 0 & -18,9671 & 9,0867 \\ 1,9247 & -19,9149 & 7,7565 & 0 \\ 69,1314 & -23,8689 & -2,5966 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2,2582 \\ -23,8289 & 1,5015 \\ -11,7532 & -15,2855 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

ahol:  $v$  az oldalirányú egyenes vonalú mozgás sebessége, [m/s];  $p$  az orsózó szögsebesség, [fok/s];  $r$  a legyező szögsebesség, [fok/s];  $\phi$  a dőlési szög, [fok];  $\delta_a$  a csűrőlapok szöghelyzet változása, [fok]; és végül,  $\delta_r$  az oldalkormány szöghelyzet változása, [fok]. Bár az értekezés ábráin szerepeltettem a mértékegységeket, célszerű lett volna ezt megtenni az értekezés szövegtörzsében is.

## Kérdés

– A kereszt dinamikából hogyan lehet (7.2) a rövidperiodikus mozgás? Milyen speciális mozgásformák vannak a merevszárnyú repülőgép kereszt dinamikájában?

**Válasz:** a Trainer-60 SUAV oldalirányú mozgásának állapotteres modellje a következő volt:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,7724 & 0 & -18,9671 & 9,0867 \\ 1,9247 & -19,9149 & 7,7565 & 0 \\ 69,1314 & -23,8689 & -2,5966 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2,2582 \\ -23,8289 & 1,5015 \\ -11,7532 & -15,2855 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

E dinamikus rendszermodell egy két bemenetű, és négy kimenetű irányítási rendszert ír le. A mi esetünkben, azt szeretnénk vizsgálni, hogy az UAV robotpilótája hogyan képes stabilizálni a  $\phi$  dőlési szöget, mert e szög elérésének idejére a hagyományos légi járművek számára dinamikus minőségi követelményeket fogalmaznak meg<sup>23</sup>.

Ily módon, a dőlési szög szabályozó rendszerek csak a csűrőlapok  $\delta_a$  kitérésére építenek, és nem számolnak az oldalkormány  $\delta_r$  használatával.

Mivel a vizsgálat tárgyát képező és számunkra használni kívánt rendszerdinamika nem foglalkozik a kereszt-tengely mentén az egyenesvonalú mozgás  $v$  sebességével, ezért az oldalirányú mozgás állapotegyenlete most a következő alakot veszi fel:

<sup>22</sup> [https://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392m/ee392m.1056/Lecture14\\_MPC.pdf](https://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392m/ee392m.1056/Lecture14_MPC.pdf) . Letöltve: 2024. 10. 24.

<sup>23</sup> [https://engineering.purdue.edu/~andrisan/Courses/AAE490F\\_S2008/Buffer/mst1797.pdf](https://engineering.purdue.edu/~andrisan/Courses/AAE490F_S2008/Buffer/mst1797.pdf) . Letöltve: 2024. 10. 24.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19,9149 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -23,8289 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_a \quad (7.2)$$

A (7.2) egyenletrendszer első egyenlete forgó mozgást leíró differenciálegyenlet, míg a második egyenlete Euler-féle kinematikai egyenlet, ami egy integráló kapcsolat az orsózó szögsebesség, és a dőlési szög között.

R. W. Beard, T.W. McLain: Small Unmanned Aircraft (2012) könyvében (68. o.) az alábbi oldalirányú mozgásfajtákat, és az azokat leíró alábbi reprezentatív átviteli függvényeket (zavarásmentes eset) különböztette meg:

- $Y_1(s) = \frac{p}{\delta_a}$ ,
- $Y_2(s) = \frac{\phi}{\delta_a} = \frac{p}{\delta_a s}$ ,
- $Y_3(s) = \frac{\chi}{\phi} = \frac{g/V_a}{s}$ ,
- $Y_4(s) = \frac{\beta}{\delta_r}$ , vagy  $Y_5(s) = \frac{v}{\delta_r}$ .

### Kérdés

- A (7.2) ábra egy kaskád P szabályozást ábrázol. Miért volt szükség az erősítések LQR módszerrel való tervezésére? Milyen más egyszerűbb módszerrel lehetne az erősítéseket meghatározni? A (7.3)-ban adott LQ súlyok kielégítik a (7.96) alatt megadott feltételeket? A 7.3 ábrán publikált eredmények rendben vannak, de kérem melléjük a csűrőkormánykiterés ábrázolását és a Trainer 60 UAV kiterési korlátai szerint való értékelését! A 7.5 ábra szerint a fázistartalék majdnem 80 fok lett. Ez lehetővé teszi a szabályzó gyorsítását. Ha a megengedett csűrőkormánykiterés is lehetővé teszi, akkor kérem egy gyorsított szabályzó tervezését, ami csupán 40-50 fok fázistartalékot hagy a rendszerben!

**Válasz:** a szabályozó tervezésére az LQR módszert magam választottam, mert az volt a célom, hogy az LQR-tervezés gyakorlati alkalmazását egy önálló MATLAB script-ben mutassam be.

A szabályozó tervezésére egyszerűbb módszerként használhattuk volna például a pólus allokációs módszert, amelynek lényege, hogy a zárt szabályozás dinamikus minőségi jellemzőit a zárt rendszer előre megadott pólusai határozzák meg.

A megtervezett szabályozó biztosítja, hogy a zárt rendszer pólusai az 's'-síkon az előre megadott helyekre essenek. Mivel a bemutatott szabályozás egy másodrendű dinamikus rendszer, a szabályozó tervezése során a domináns póluspár módszerére is támaszkodhattunk volna.

Az LQR-szabályozótervezés során a

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = 1 \quad (7.3)$$

súlyokat, míg az LQG-szabályozó tervezésekor, annak az LQR részben a

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10000000000 & 1 \\ 0 & 0,000001 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = 10000; \quad (7.106)$$

míg az LQE részben a

$$\mathbf{Q}_E = 0,1; \mathbf{R}_E = 0,001 \quad (7.108)$$

súlyokat alkalmaztam.

A Trainer-60 SUAV<sup>24</sup> pontos sárkányszerkezeti-geometriai elrendezésére a 21. ábrán látható. Könnyű belátni, hogy a még a leginkább informatív sárkányszerkezeti-szerelési ábra sem tartalmaz semmilyen információt sem a kormányfelületek maximális kitéréséről, sem pedig az automatizált repülések során a megengedett maximális kormányfelület kitérésekről.

Repülésbiztonsági okok miatt, a robotpilóták a kormányfelületek teljes üzemi járatának rendszerint csak kis részében, általában csak néhány %-ában képesek a tervezett maximális kitéritési sebességekkel a kormányfelületeket mozgatni.

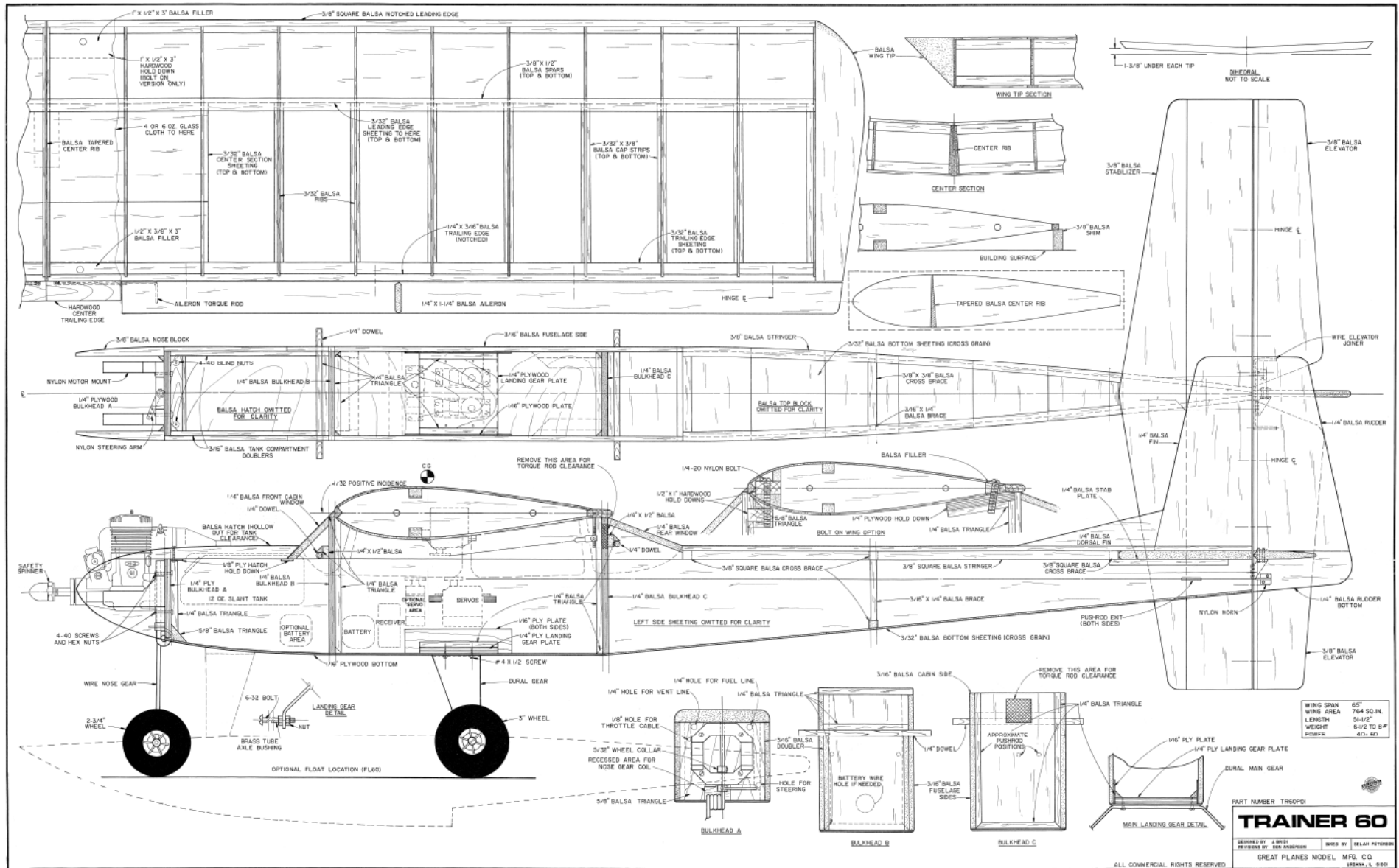
E beavatkozások és a sebességeik biztosítják a nagyfrekvenciás zavarások és zajok kiküszöbölését. E korlátozások általában a hagyományos, ember által irányított légi járművek irányítására igazak.

Agilis, vagy agresszív manőverekre tervezett UAVk (pl. felszíni célok ellen indított cirkáló löszerek) esetén a tervezők eleve a maximális sebességű teljes kormánykitérésekkel számolnak.

Ily módon, normál repülési helyzetben akár a csűrőlap  $\delta_a = (3 \div 10)^\circ$  szögkitérések, míg agilis-agresszív manőverek (pl. manőverező, felszíni célok ellen indított cirkáló löszerek célba juttatásának utolsó repülési fázisa) esetén akár a  $\delta_a = (15 \div 20)^\circ$  szögkitérések is megengedettek, de szükség esetén az aerodinamikai kormányfelületek akár a teljes kitéritési tartományt is bejárhatják, minden korlátozás nélkül.

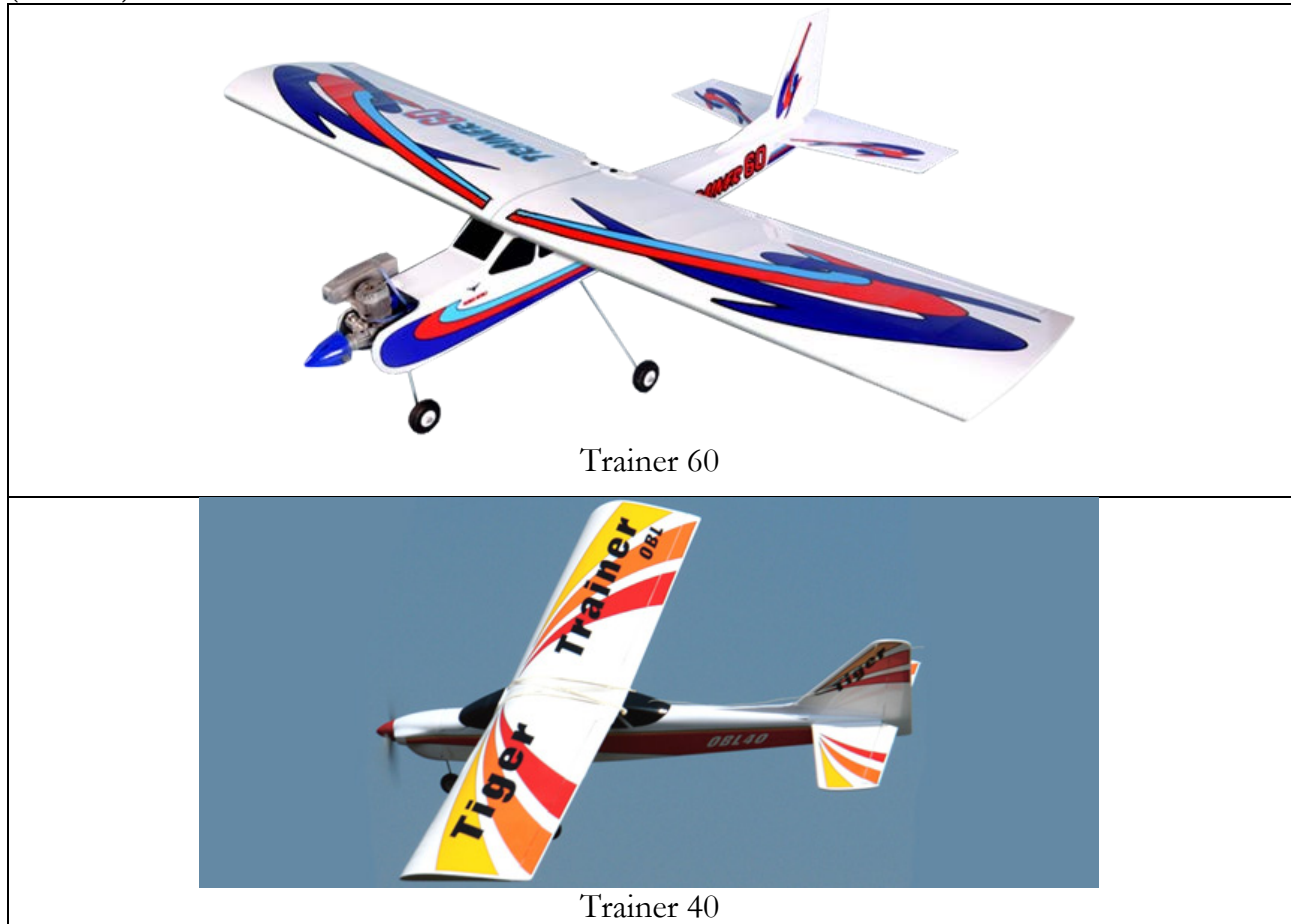
---

<sup>24</sup> <https://falcon.com.kw/trainer-60-91-15cc.html>. Letöltve: 2024. 10. 24.



21. ábra. A Trainer-60 SUAV sárkányszerkezeti kialakítása.

A 'Trainer' SUAV család egyik tagjának, a Thunder Tiger-Trainer 40 OBL AFR SUAV<sup>25</sup>-nak (22. ábra) a következő adataival számoltak<sup>26</sup>:



22. ábra. Trainer UAVk

csűrőlap kitérés:  $\delta_a \leq 3^\circ$ ,

oldalkormány kitérés:  $\delta_r \leq 3^\circ$ .

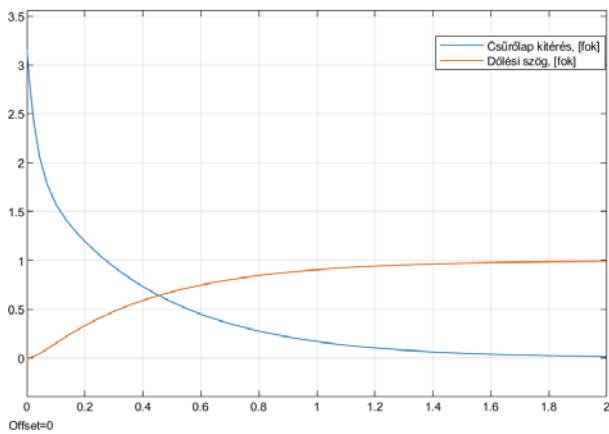
Megállapíthatjuk tehát, hogy az egyes szabályozási feladatok megoldása során fontos ugyan az egyes kormányfelület kitérések ismerete, de az állami célú, főként katonai UAV alkalmazások más szemmel tekintenek erre az információra, mint azt az automatikus repülésszabályozással foglalkozó szakemberek teszik.

A 7.2. ábrán látható zárt szabályozási rendszer átmeneti függvénye, és a csűrőlapok szögkitérése a 23. ábrán látható. A 23. ábrán is jól látható, hogy a kisértékű bedöntési szögek stabilizálása során, a  $\phi_{ref} = 1(t)$  egységugrás bemeneti jel lekövetését  $\delta_a \cong 3,2$  fokos csűrőlap kitérés hozza létre a szabályozóerősítés  $K_e = 3,1623$  értéke mellett. Ez az érték a Trainer-60 UAV esetében a megengedett korlátozások tartományán belül helyezkedik el.

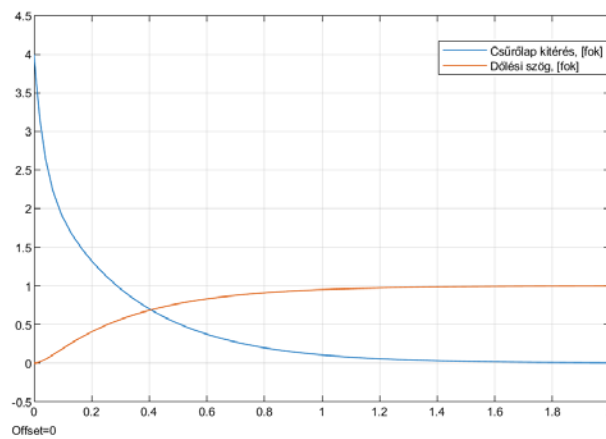
A szabályozó erősítését akár kismértékben is növelve, már a  $K_e = 4$  esetén a csűrőlapok kitérése eléri a  $\delta_a \cong 4$  fokot (23. ábra).

<sup>25</sup> <https://www.modelaviation.com/thundertigertrainer40>. Letöltve: 2024. 11. 15.

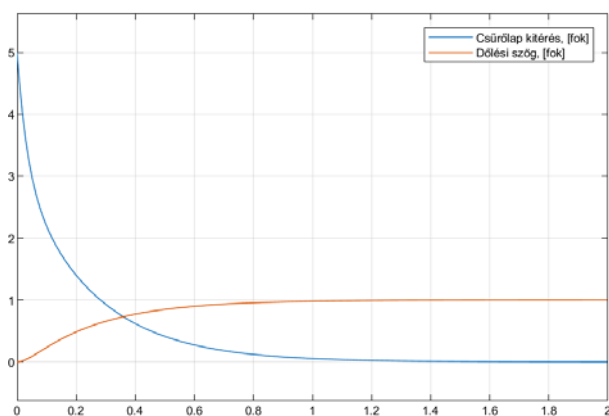
<sup>26</sup> Kamal, A.M., Bayoumy, A:M., Elshabka, A:M.: Modeling and flight simulation of unamned aerial vehicle enhanced with fine tuning. Aerospace Science and Technology, Vol51, PP8106-117), 2016. Modeling and flight simulation of unmanned aerial vehicle enhanced with fine tuning - ScienceDirect



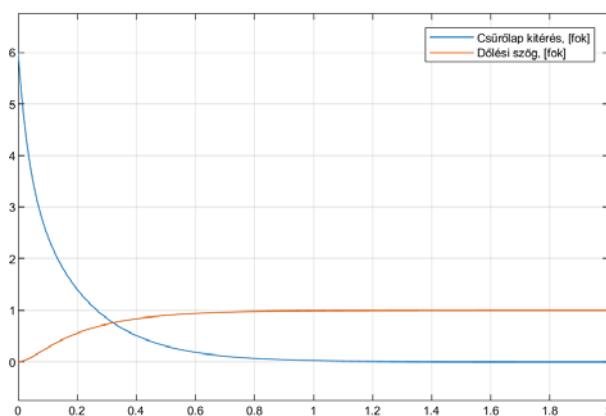
$$K_e = 3,1623$$



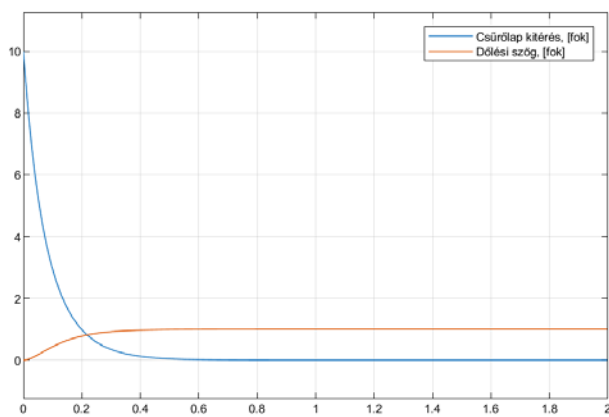
$$K_e = 4$$



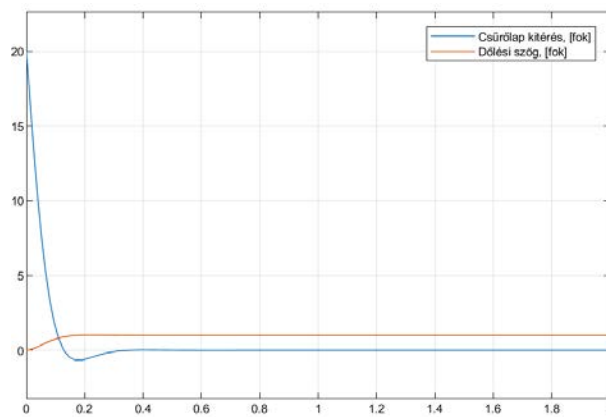
$$K_e = 5$$



$$K_e = 6$$



$$K_e = 10$$

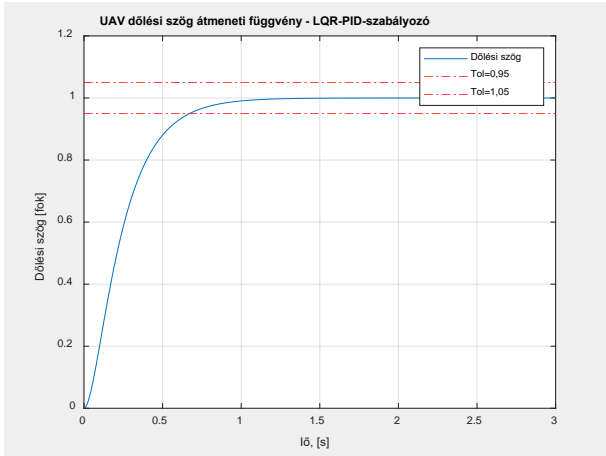


$$K_e = 20$$

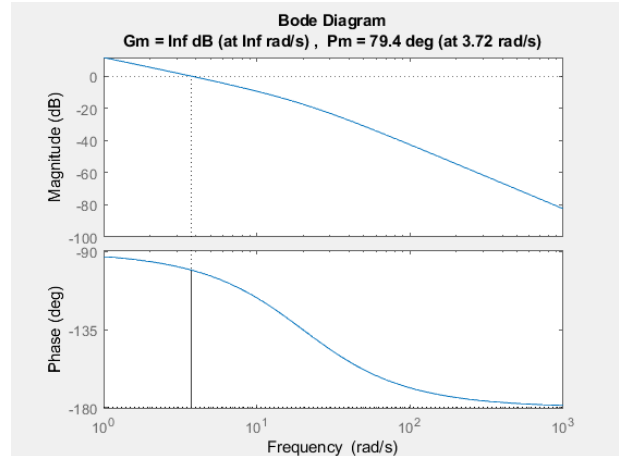
23. ábra. A Trainer-60 SUAV tranziens folyamatai.

A 23. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a szabályozó  $K_e$  erősítését növelve, növekszik a csűrőlapok szögkitérése is, és  $K_e = 20$  erősítés esetén a dőlési zárt repülés szabályozó rendszerben még előjelváltó ellenkormányzásra is szükség van.

A P-szabályozóval működő és a 7.2. ábrán látható, melynek viselkedését a 7.3. és a 7.5 ábrák mutatják be. A dőlési szög stabilizáló rendszer fázistartaléka  $\varphi_t = 79,4$  fok.



7.3. ábra



7.5. ábra

A kisebb fázistartalékkal működő, gyorsabb szabályozási rendszert eredményező új szabályozóstruktúra kiválasztása a 7.5. ábra alapján történt: az eredeti P-szabályozó erősítését megváltoztatva, azt fázissiettető-egytárolás jelleggel egészítettem ki, vagyis a szabályozó átviteli függvényének általános alakja a következő lesz:

$$Y(s) = K \cdot \frac{sT_1+1}{sT_2+1}, \text{ ahol } T_1 > T_2$$

A fenti szabályozóstruktúrát felhasználva, a  $\varphi_t$  fázistartalék csökkentésére – az eredeti rendszer mellett – az alábbi átviteli függvényeket használtam:

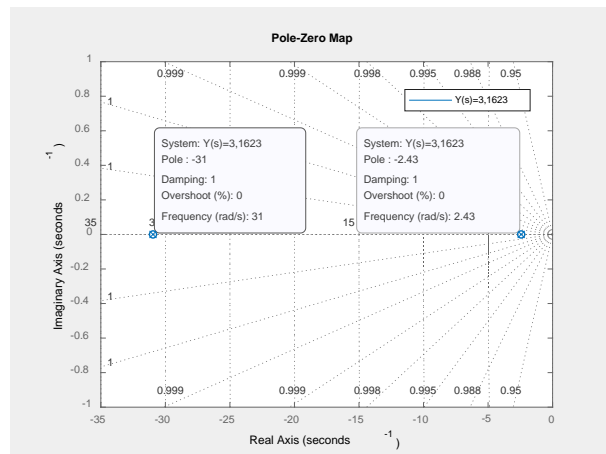
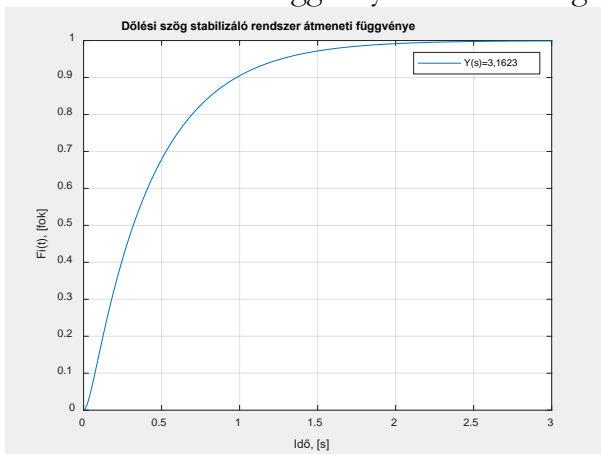
$$Y_1(s) = K_e = 3,1623$$

$$Y_2(s) = K_1 \cdot \frac{sT_1+1}{sT_{21}+1} = 6 \cdot \frac{s+1}{\frac{1}{10}s+1}$$

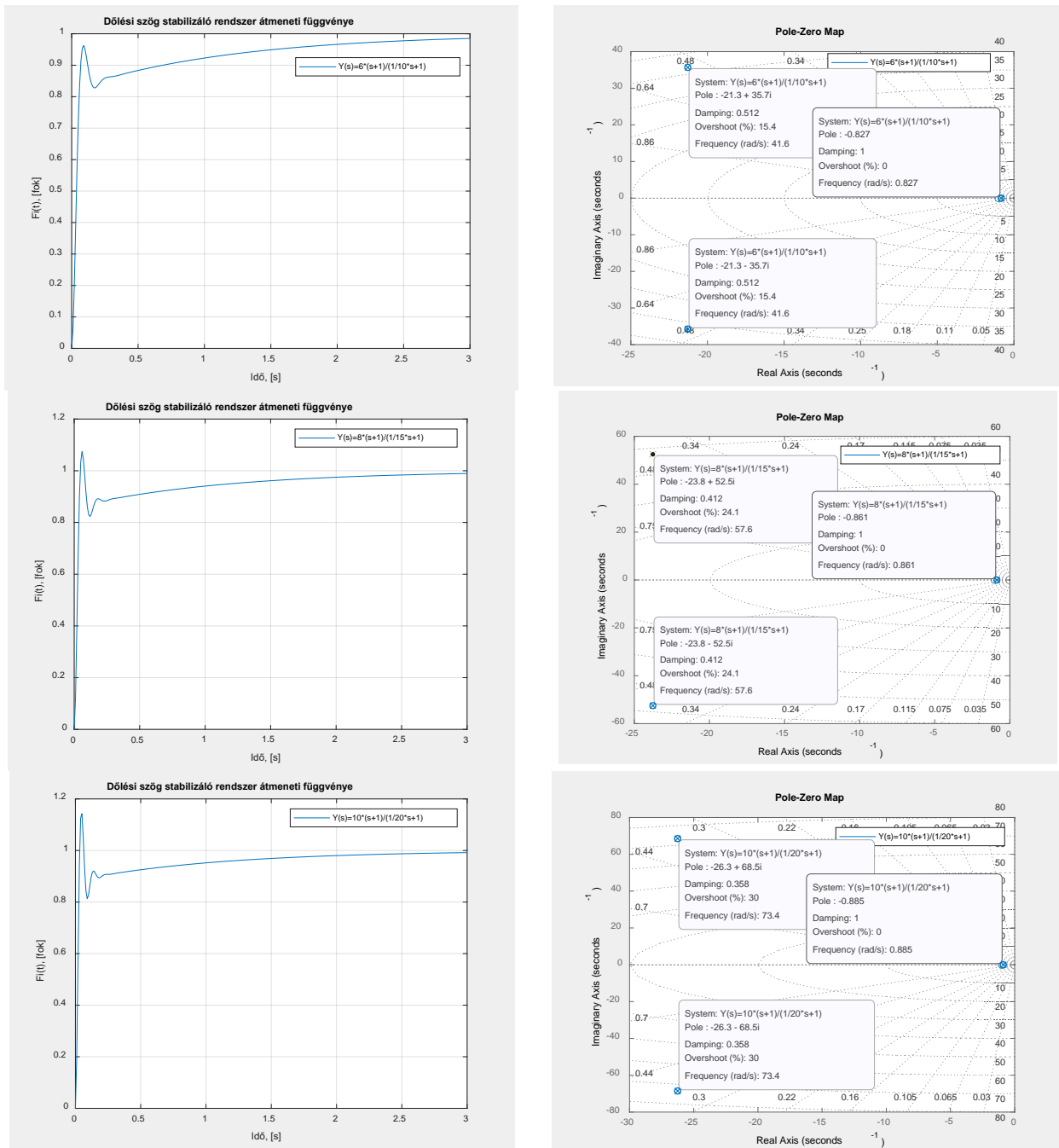
$$Y_3(s) = K_2 \cdot \frac{sT_1+1}{sT_{22}+1} = 8 \cdot \frac{s+1}{\frac{1}{15}s+1}$$

$$Y_4(s) = K_3 \cdot \frac{sT_1+1}{sT_{23}+1} = 10 \cdot \frac{s+1}{\frac{1}{20}s+1}$$

Az eredeti, P-szabályozóval működő, és az új szabályozókkal működő zárt szabályozási rendszerek átmeneti függvényei és a minőségi jellemzői a 24. ábrán láthatók.



24. ábra. A dőlési szög stabilizáló rendszer átmeneti függvényei és minőségi jellemzői.



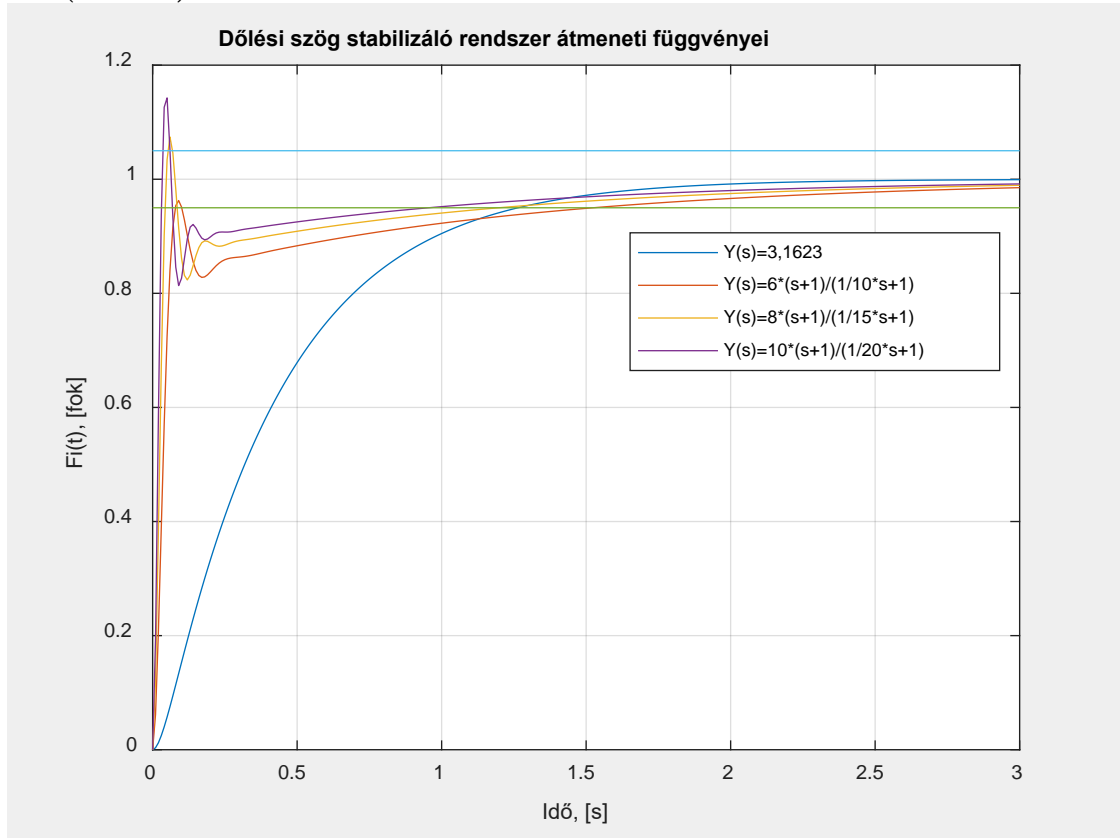
24. ábra. A dőlési szög stabilizáló rendszer átmeneti függvényei és minőségi jellemzői (folyt.)

A 24. ábra alapján foglaljuk össze a Trainer-60 UAV minőségi jellemzőit, melyeket az alábbi táblázatban látunk:

Szabályozó típusok	Pólusok, $p_i$	Csillapítási tényező, $\xi$ , [-]	Túllövés, $\sigma$ , [%]
$Y_1(s) = 3,1623$	$p_1 = -2,43$ $p_2 = -31$	1	0
$Y_2(s) = K_1 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{21} + 1} = 6 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{10}s + 1}$	$p_{1,2} = -21,3 \pm 35,7 \cdot i$ $p_3 = -0,827$	0,512	15,4
$Y_3(s) = K_2 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{22} + 1} = 8 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{15}s + 1}$	$p_{1,2} = -23,8 \pm 52,5 \cdot i$ $p_3 = -0,861$	0,412	24,1
$Y_4(s) = K_3 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{23} + 1} = 10 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{20}s + 1}$	$p_{1,2} = -26,3 \pm 68,5 \cdot i$ $p_3 = -0,885$	0,358	30



A 24. ábra alapján elmondhatjuk, hogy dőlési szög zárt stabilizáló rendszer működését sikerült gyorsítani (25. ábra).

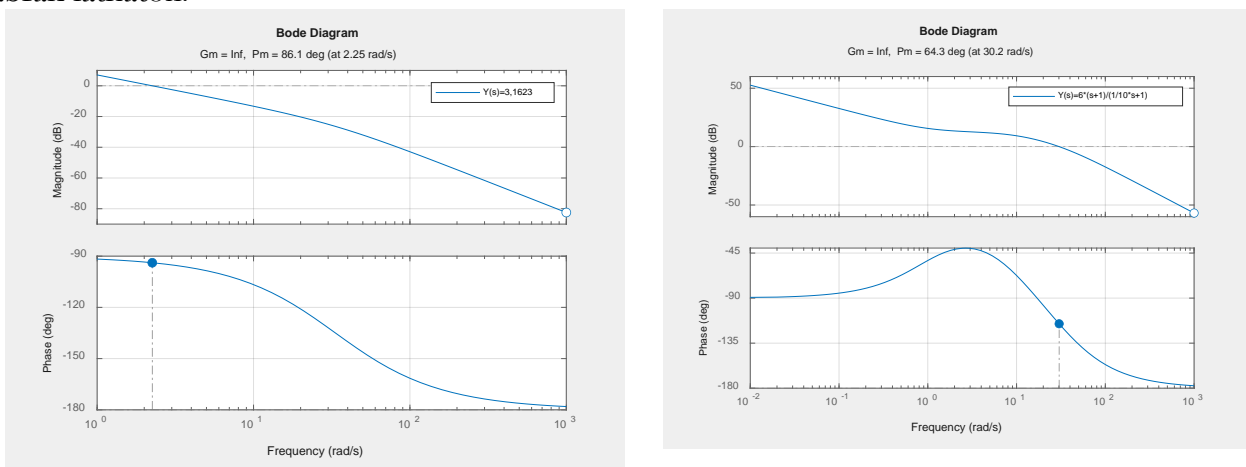


25. ábra. A dőlési szög stabilizáló rendszer átmeneti függvényei.

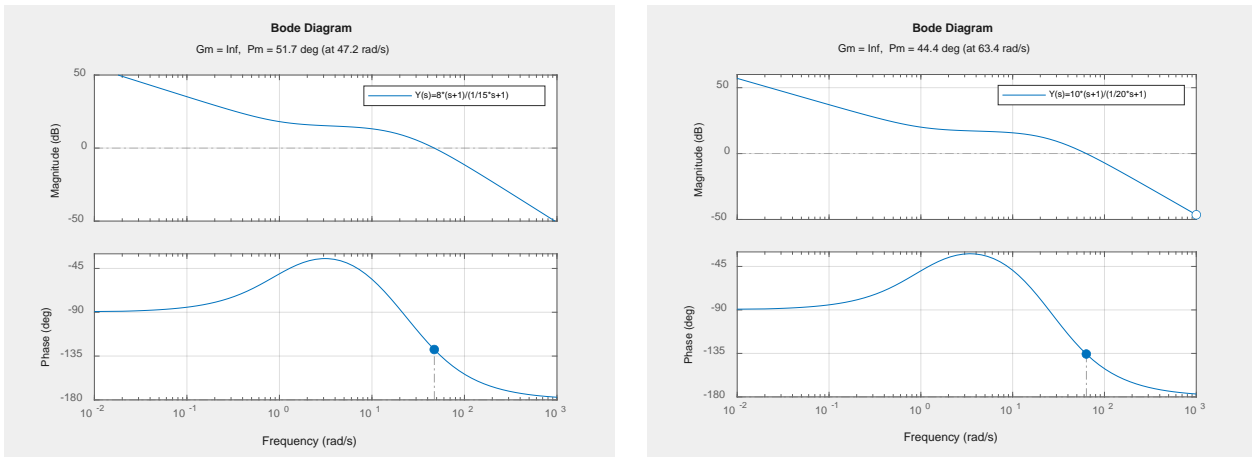
Mindazonáltal meg kell említeni, hogy az új szabályozó típusok növelik a  $\sigma$  túlszabályozás értékét, és csökkentik a  $\xi$  csillapítási tényezőt.

Ha a zárt szabályozási rendszerre több minőségi jellemző egyidejű teljesülését írják elő, akkor vizsgálatainkat nem korlátozhatjuk csak és kizárólag a zárt rendszer beavatkozási, működési sebességére.

A különféle szabályozókkal működő, felnyitott szabályozás rendszerek Bode diagramjai a 26. ábrán láthatók.



26. ábra. A dőlési szög felnyitott szabályozási rendszerének vizsgálata frekvenciatartományban.

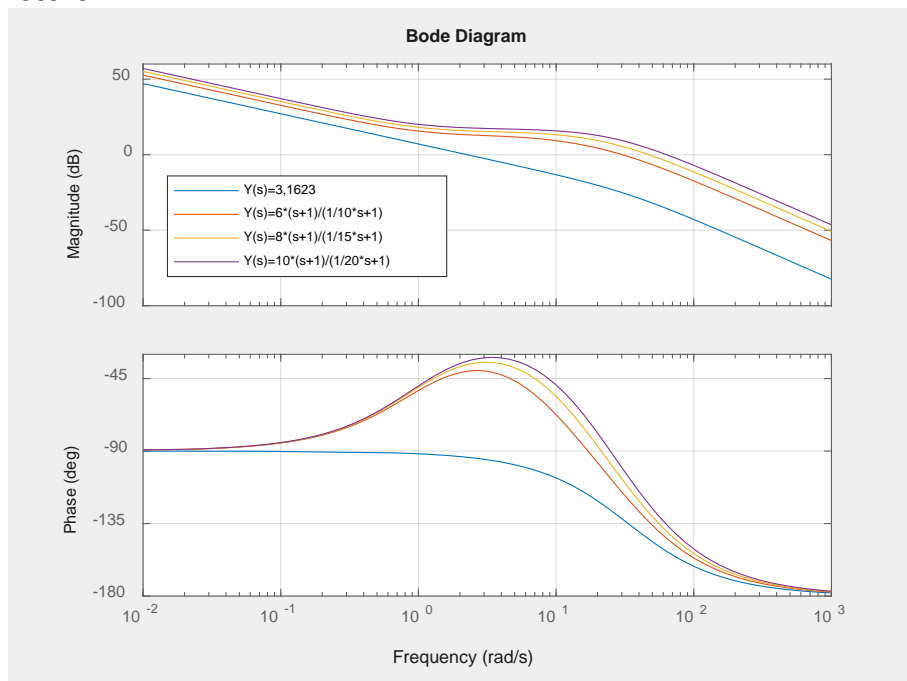


26. ábra. A dőlési szög felnyitott szabályozási rendszerének vizsgálata frekvenciatartományban (folyt.)

A 25. ábrán jól látható, hogy a szabályozók csökkentik a  $\varphi_t$  fázistartalék értékeit, amelyeket az alábbi táblázatban foglalkok össze:

Szabályozó típusok	Fázistartalék, $\varphi_t$ , [fok]
$Y_1(s) = 3,1623$	86,1
$Y_2(s) = K_1 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{21} + 1} = 6 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{10}s + 1}$	64,3
$Y_3(s) = K_2 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{22} + 1} = 8 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{15}s + 1}$	51,7
$Y_4(s) = K_3 \cdot \frac{sT_1 + 1}{sT_{23} + 1} = 10 \cdot \frac{s + 1}{\frac{1}{20}s + 1}$	44,4

A különféle szabályozókkal működő, felnyitott szabályozás rendszerek Bode diagramjait a 27. hasonlíthatjuk össze.



27. ábra. A dőlési szög felnyitott szabályozási rendszerének Bode diagramjai.

A 27. ábra 'erősítés-körfrekvencia' jelleggörbén jól látható a vágási körfrekvencia növekedési, ami a tranziens idő csökkenését is jelenti.

## Kérdés

- A 7.5 (és 7.9) ábrán a felnyitott hurok Bode diagramja a külső hurokra vonatkozik? Azaz a  $K_S$  erősítést már tartalmazza? A (7.8) egyenletben a  $K_c$  erősítés megválasztása mi alapján történt? És mi indokolja, hogy az integráló tag  $T_I$  időállandója 10s legyen? Milyen megfontolások vezettek ide? Hogyan lehetne gyorsítani a szabályzást? Mi indokolja a D tag külön hozzáadását a bedöntési szög szabályzóhoz (7.11) tekintettel a 7.2 ábrán a bedöntési szögsebességre alkalmazott  $K_S$  tagra, ami a bedöntési szögre vonatkozóan D tagként viselkedik? Különös tekintettel arra, hogy bevett gyakorlat a szögsebességek D tagként való visszacsatolása a szög szabályzóban (lásd pl. Beard, R. W. - McLain, T.W.: Small Unmanned Aircraft. Princeton University Press, Princeton and Oxford, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012.) elkerülve a deriválásból eredő Szczrő által is említett problémákat. A (7.14) felsorolásban megadott paraméterek milyen módszerrel kerültek felvételre? Mi indokolja a 200-as erősítés alkalmazását az addigi nagyjából 3-as  $K_c$  erősítés helyett? A 7.17 és 7.18 ábrák mind azt támasztják alá, hogy a rendszer gyors, de elfogadhatatlanul túlvezérelt, ráadásul a zavarelnyomás tranziense lassab lett (bár a zavarás hatására való kitérés jóval kisebb) ahogy a 7.21 ábra mutatja. Ráadásul a 7.19 ábra szerint a fázistaralék 17 fokra csökkent, ami már tényleg túl alacsony egy bizonytalan rendszer esetén. Kérem a csűrőkormánykitéréseket is ábrázolni a különféle szabályzókkal és összevetni a Trainer-60 UAV korlátaival.

Összességében a 7.2 ábrán vázolt szabályzás újratervezését kérem a  $K_S$ , mint D tag és a PI szabályzó (7.8) újrahangolásával, majd a jelkövetés, a zavarelnyomás, a kormányfelület kitérések és a fázis- és erősítési tartalék elemzésével!

**Válasz:** A (7.5) és a (7.9) ábrákon látható Bode diagramok a külső hurok, a dőlési szög ágában, az ellenőrző jel helyén, a különbségképző szerve bemenete előtt felbontott rendszer frekvenciafüggvényei. Az egyszerűbb jelölés miatt, a külső hurok egységnyi erősítését, ami a dőlési szög érzékelőjét reprezentálja, szokás elhagyni, és külön egységnyi taggal már nem jelölni. A belső hurok eredő átviteli függvénye a szögsebesség érzékelő  $K_S$  erősítését már tartalmazza. A (7.2) rendszer egy teljes állapot-visszacsatolású rendszer, amelynek mindkét állapotváltozóját (dőlési szögsebesség, dőlési szög) hagyományos érzékelők mérik, és alakítják át villamos jellé.

A (7.8) egyenletben szereplő  $K_c$  erősítést a szabályozótervezés első szakaszában az LQR-módszerrel terveztem, és annak értéke

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = 1$$

alakú heurisztikus súlyozás mellett:

$$\mathbf{K} = [K_S \quad K_c] = [0.5656 \quad 3.1623]$$

A (7.8) egyenletben megadott PI-szabályzó átviteli függvénye

$$Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I} = \frac{sT_I K_c + 1}{sT_I}$$

E szabályzó esetén a külső, felnyitott hurok átviteli függvénye

$$Y_{O.L.} = Y_c(s) \cdot Y_{belső}(s) \cdot \frac{1}{s} = \frac{sT_I K_c + 1}{sT_I} \cdot \frac{\frac{A}{1+sT}}{1+K_S \frac{A}{1+sT}} \cdot \frac{1}{s} = \frac{(1+31,623s)}{10s} \frac{1,1965}{(1,6767+0,0502s)} \frac{1}{s}$$

alakú lesz, ami egy II-típusú rendszert reprezentál.

A PI-szabályozó  $T_I$  időállandóját olyan megfontolásból választottam, hogy az I-tag kisfrekvenciás tartományban fejtsse ki a hatását, ahol például a kisfrekvenciás, külső zavarások, pl. lassú, vagy állandó oldalszél, fejtik ki a hatásukat.

Ha a külső zavarásokról, azok viselkedéséről pontos információkkal rendelkezünk, akkor a legjobb zavarvédetség elérése érdekében a szabályozót újra kell hangolni.

A (7.11) ábrán bemutattam, hogy a PI- szabályozó, bár javítja a rendszer zavarelhárító képességét, de ezzel egyidejűleg lassítja is a zárt rendszer működését, növeli az átmeneti folyamatok idejét. Eme hátrány kiküszöbölhető, vagy hatásában nagyrészt csökkenthető, hogy a soros PID-szabályozóban aktiváljuk a D-ágot is, így téve teljessé a szabályozó képességeit.

A D-ág aktiválása azt jelenti, hogy a tranziensek kezdetén a beavatkozó jelhez, és annak integráljához hozzáadódik a hibajel deriváltja is, ami a tranziens folyamatok kezdetén megnöveli a beavatkozó jel értékét, tehát gyorsítja a rendszer átmeneti folyamatait.

Az értekezés (7.11) egyenlete

$$Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I} + sT_D = \frac{sT_I K_c + 1 + s^2 T_D T_I}{sT_I}; \quad K_D = T_D \quad (7.11)$$

általános alakban adja meg a szabályozó átviteli függvényét, amelynek D-tagja nem megvalósítható, mivel a nevező 's' polinomja mindig magasabb, legfeljebb azonos fokszámú a számláló 's' polinomjával, vagyis:

$$sT_D = \frac{sT_D}{1} = \frac{sT_D}{s^0}.$$

Ily módon, a mi estünkben a nevező egy 0-adrendű 's' polinom, míg a számláló egy 1-rendű 's' polinom, tehát az ideális D-tag egy nem megvalósítható irányítástechnikai tag, amit – többek között – a MATLAB® is így kezel:

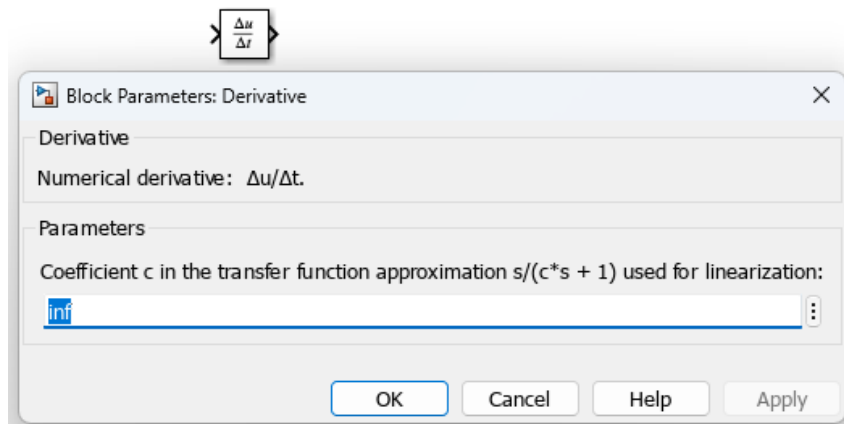
```
>> % D-tag
n=[1 0];
d=[0 1];
sys_d=tf(n,d)
step(sys_d)
pause, clf, close

sys_d =

      s

Continuous-time transfer function.
Model Properties
Error using DynamicSystem/step (line 97)
Cannot simulate the time response of improper (non-causal) models.
```

Hasonlóképpen, a MATLAB® Simulink™ 'Derivative' blokkja – a fizikai megvalósíthatóság érdekében – szintén közelítő átviteli függvényt alkalmaz:



Kiküszöbölendő a PID-tag lehetséges megvalósításával kapcsolatos nehézségeket, az alábbi közelítő PID-szabályozó alkalmazását javasoltam:

$$Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I} + sT_D \cong \frac{sT_I K_c + 1 + s^2 T_D T_I}{sT_I(1+sK)}; \quad K \rightarrow 0 \quad (7.12)$$

A (7.12) szabályozó esetén a nevező és a számláló 's' polinomjainak fokszáma már azonos, ez a szabályozó már megvalósítható.

A 7.2. ábrán általam bemutatott dőlési szög szabályozó rendszer a 37. kérdéscsoportban hivatkozott forrás 6.7. számú ábrája (28. ábra)

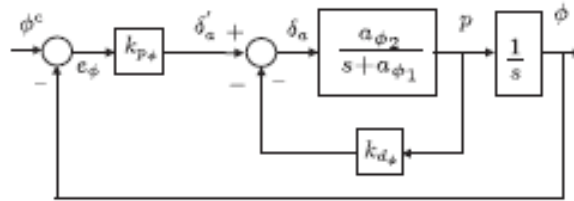


Figure 6.7 Roll attitude hold control loops.

28. ábra. Dőlési szög stabilizáló rendszer egyszerűsített hatásvázlata.

E forrás is első lépésben tartja szükségesnek a dőlési szög stabilizáló rendszerek előre vezető ágban a soros szabályozó  $K_c$  (a fenti 28. ábrán:  $k_{p\phi}$ ) erősítésének, és a belső visszacsatoló ágban az érzékelő  $K_s$  (a 28. ábrán:  $k_{d\phi}$ ) erősítésének megválasztását, vagy tervezését (99.-100. oldalak), amelyekre, mint 'control gain'-ekre hivatkozik.

A belső hurok ágában szerepeltetett  $K_s$  ( $k_{d\phi}$ ) erősítés a szögsebességérzékelő átviteli függvénye, ami a mi esetünkben egy arányos tag. A külső hurokban is szerepel a szöghelyzet érzékelő modellje, de annak egységnyi erősítési tényezőjét csak ritkán szokás jelölni.

D. McLean a hagyományos, ember által vezetett légitársaságok dőlési szög szabályozó rendszerének egyszerűsített hatásvázlatát a 28. ábrán látható hatásvázlattal adja meg<sup>27</sup>. E rendszerben még az egységnyi erősítést, mint a szöghelyzetérzékelő (ebben az esetben 3-szabadságfokú giroszkópra épülő műhorizont-rendszer érzékeli a dőlési szöget) is egy külön szerkezeti egységként ábrázolja (28. ábra)

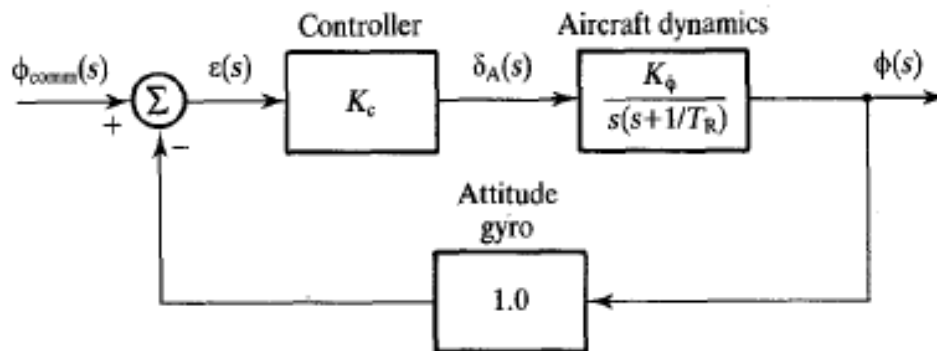


Figure 10.5 Bank angle control system.

29. ábra. Dőlési szög stabilizáló rendszer egyszerűsített hatásvázlata.

<sup>27</sup> D. McLean: Automatic Flight Control System. Prentice-Hall, Inc., 1990.

E jelöléseknek akkor van jelentősége, ha az érzékelők kimeneti jelét, még az érzékelő kimeneti jelének fizikai visszacsatolása előtt egy megfelelően megválasztott és megtervezett szűrő segítségével szűrjük, és szükség szerint jelformáljuk.

Ha és amennyiben a belső hurokban  $K_S (k_{d\phi})$  egy D-tag lenne, akkor belső hurok ágában a szögsebesség deriváltja, vagyis a szöggyorsulás szerint valósulna meg a visszacsatolás.

A kérdésben hivatkozott forrás<sup>28</sup> az UAV robotpilóták alábbi fajtáit foglalja össze, és mutatja be azokat az egyszerűsített hatásvázlataikkal:

1. 6.5. 2-rendű, visszacsatolt zárt szabályozási rendszer elvi sémája. Az elvi hatásvázlaton, véleményem szerint,
2. 6.6. ábra: a teljes oldalirányú mozgást automatizáló robotpilóta (belső hurok: dőlési csillapító automata; középső hurok: dőlési szög stabilizáló rendszer; külső hurok: irányszög stabilizáló rendszer) 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
3. 6.7. ábra: dőlési szög stabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
4. 6.8. ábra: dőlési szög stabilizáló rendszer hatásvázlata külső zavarás figyelembevételével: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
5. 6.9. ábra: dőlési szög stabilizáló rendszer hatásvázlata külső zavarás figyelembevételével, és a zavarvédeltséget javító 'PI' soros kompenzátorral: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
6. 6.11. ábra: irányszög stabilizáló rendszer hatásvázlata külső zavarás figyelembevételével, és a zavarvédeltséget javító 'PI' soros kompenzátorral: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
7. 6.13. ábra: (zérus referencia értékű) csúszásszög stabilizáló rendszer hatásvázlata külső zavarás figyelembevételével, és a zavarvédeltséget javító 'PI' soros kompenzátorral: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
8. 6.15. ábra: bólintó szög stabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
9. 6.16. ábra: 'PI'- szabályozóval működő, repülési magasság stabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
10. 6.17. ábra: 'PI'- szabályozóval működő, külső zavarás hatása alatt működő, repülési magasság stabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
11. 6.18. ábra: a bólintó szög irányítási csatornára épülő, változó repülési magasságon repülő, 'PI'- szabályozóval működő, sebességstabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz;
12. 6.19. ábra: a vonó/tolóerő szabályozására épülő, állandó repülési magasságon repülő, 'PI'- szabályozóval működő, sebességstabilizáló rendszer hatásvázlata: 'D'-tagot egyáltalán nem tartalmaz.

A modern repülésszabályozó rendszerek és robotpilóták érzékelői általában a robotpilóta nyomtatott áramkörére integrált.

A repülési paraméterek érzékelése, és előállítása terén főként az a gondolkodás uralkodik, hogy 3 gyorsulásmérő segítségével érzékelik az UAV test-koordináta rendszere tengelyei mentén a gyorsulásvektor komponens összetevőit, és további 3 szögsebesség-érzékelő segítségével érzékelik a test-koordináta rendszer tengelyei körül az UAV forgásának szögsebességét<sup>29</sup> (30.

<sup>28</sup> R. W. Beard, T. W. McLain: Small Unmanned Aircraft, Princeton University Press, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012.

<sup>29</sup> <https://www.micropilot.com/products-mp2028-autopilots.htm>. Letöltve: 2024. 11. 02.

ábra), majd DSP-technológiát használva, integrálással állítják elő az összes lehetséges repülési paramétert (sebességek, pozíciók, és szöghelyzetek).

Sensors					
Max pressure altitude	1,250 m	12,000 m	12,000 m	12,000 m	12,000 m
Max airspeed	187 kph	500 kph	500 kph	500 kph	500 kph
3-axis accelerometers(maximum)	5 g	5 g	5 g	5 g/40g	40g
3-axis gyros(maximum)	300°/s	300°/s	300°/s	300°/s	450°/s
Attitude update rate	200 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz
Attitude accuracy	<3°	<3°	<2°	<1°	<1°
MP-Compass	Option	Option	Option	Included	Included
CAN Compass support	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes <sup>1</sup>

30. ábra. Az MP2028<sup>s</sup> robotpilóta érzékelőinek adatai.

Az FS-soros jelformáló (7.14) egyenletben megadott paramétereit a (7.10) ábrán látható Bode diagram segítségével, grafikus szerkesztéssel vettem fel, elérendő a  $\omega_c$  vágási körfrekvencia kívánatos növekedését, és ezzel együtt pedig a tranziens idő csökkenését.

A soros FS-jelformáló  $K_{FS}$  értékét is a vágási körfrekvencia megfelelő értékű növekedése határozta meg.

A 7.17. (a) ábra alapján 5%-os dinamikus pontosság mellett a tranziens idő  $t_{ss} = 0,08$  s, amely érték napjainkban a cirkáló lőszerre jellemző, és amely ezen UAV típusoknál elvárt érték.

Kilépve a klasszikus UAV repülésszabályozás konzervatív gondolkodási sémájából, a 7.21. ábra (PI+FS szabályozó) függőleges tengelye mentén az értékek  $10^{-3}$  értékkel szorzandóak, így a hibajel tranziens folyamata – megint csak 5%-os dinamikus pontossággal számolva –  $t_{ss} \cong 120$  s alatt cseng le.

A hibajel értéke az átmeneti folyamat végén  $e_{ss}(\infty) \cong 5 \cdot 10^{-4}$  fok, ami rendszerint kisebb, mint az érzékelők érzéketlenségi sávja. Más szóval, az érzékelő zérus kimeneti jele kerül visszacsatolásra, mert a mérendő mennyiséget az érzékelő nem képes érzékelni, és azt villamos jellé alakítani.

Összefoglalva tehát megállapíthatjuk, hogy a jelen esetben tett megállapításaink és következtetéseink inkább elméleti, mintsem gyakorlati jelentőséggel bírnak.

A továbbiakban vizsgáljuk meg a különféle soros szabályozóval működő dőlési szög stabilizáló rendszer alapjel követési tulajdonságait.

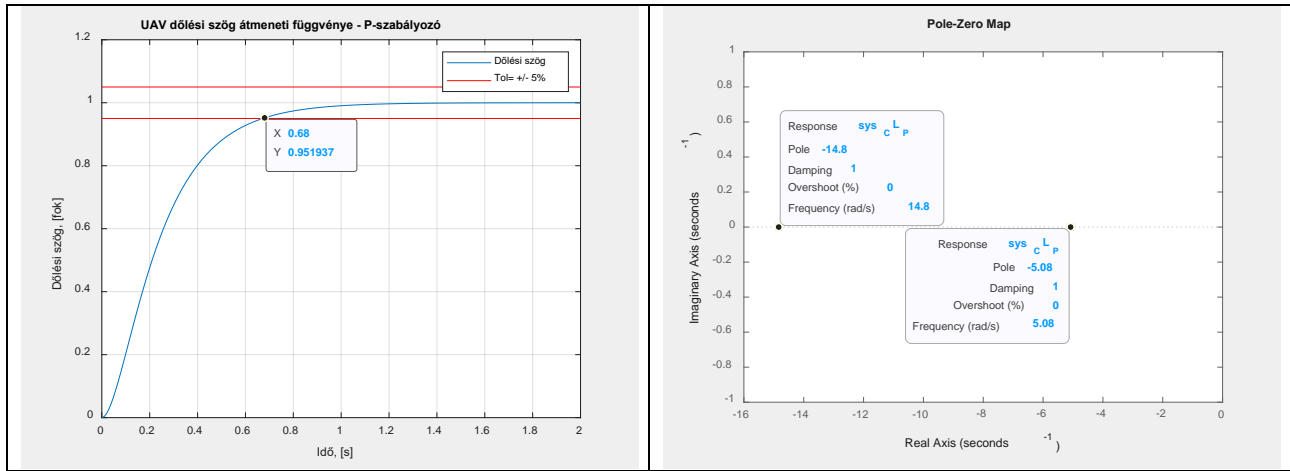
Első esetben legyen a szabályozó P-típusú, vagyis  $Y_c = K_c = 3,1623$ . E szabályozót felhasználva, a zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkozó eredő átviteli függvénye a következő lesz:

$$W_P(s) = \frac{\phi(s)}{\phi_{ref}(s)} = \frac{K_c A}{s(1+sT+K_s A)+K_c A},$$

amelynek segítségével a dőlési szög átmeneti függvényének végértéke a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_P(s) \cdot \phi_{ref}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} W_P(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_c A}{s(1+sT+K_s A)+K_c A} = 1.$$

A dőlési szög zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvénye a 31. ábrán látható.



31. ábra. A dőlési szög szabályozó rendszer átmeneti függvénye.

A második esetben legyen a szabályozó PI-típusú, vagyis  $Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I} = 3,1623 + 10/s$ . E szabályozót felhasználva, a zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkozó eredő átviteli függvénye a következő lesz:

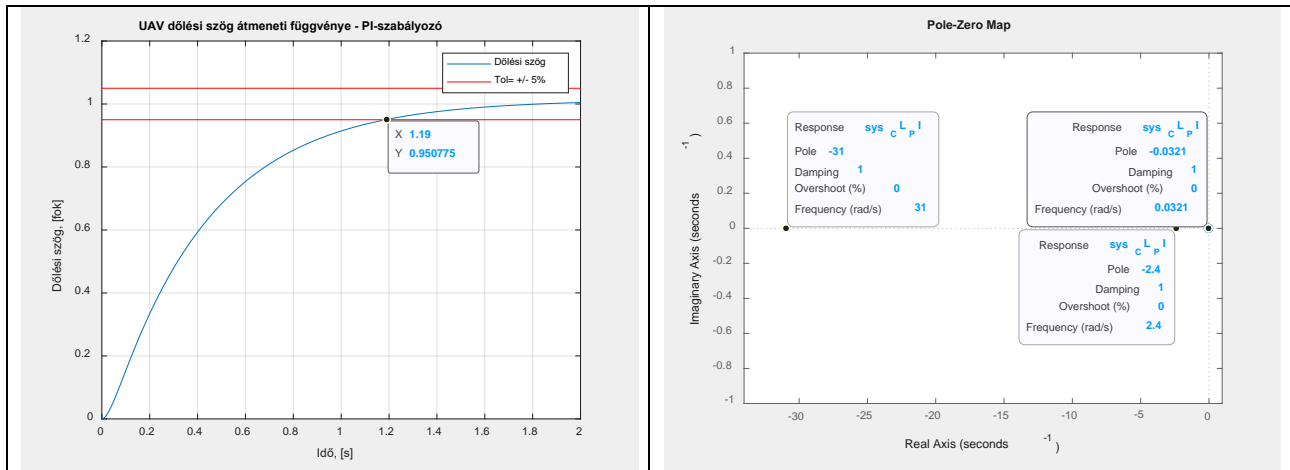
$$W_{PI}(s) = \frac{\phi(t)}{\phi_{ref}(t)} = \frac{A(sK_c T_I + 1)}{s^2 T_I (1 + sT + K_s A) + A(sK_c T_I + 1)}$$

melynek segítségével a dőlési szög átmeneti függvényének végértéke most a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_{PI}(s) \cdot \phi_{ref}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} W_{PI}(s) =$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{A(sK_c T_I + 1)}{s^2 T_I (1 + sT + K_s A) + A(sK_c T_I + 1)} = 1.$$

Az UAV dőlési szög zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvénye a 32. ábrán látható.



32. ábra. A dőlési szög szabályozó rendszer átmeneti függvénye.

Végezetül, legyen a szabályozó PI-típusú, vagyis  $Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I} = 3,1623 + 10/s$ , és használjunk  $Y_c = K_{FS} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} = K_{FS} \frac{1+10s}{1+0,03s}$  fázis-siettető előszűrőt az előre vezető ágban. A zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkozó eredő átviteli függvénye a következő lesz

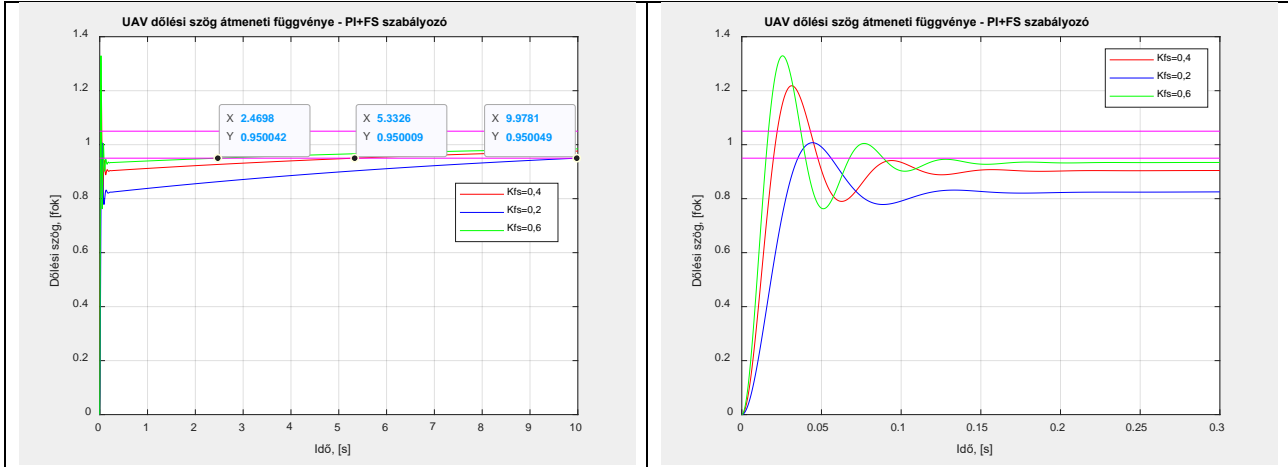
$$W_{PI+FS}(s) = \frac{\phi(t)}{\phi_{ref}(t)} = \frac{K_{FS}(sK_c T_I + 1)(sT_1 + 1)A}{s^2 T_I (sT_2 + 1)(1 + sT + K_s A) + K_{FS}(sK_c T_I + 1)(sT_1 + 1)A}$$



amelyet felhasználva a dőlési szög átmeneti függvényének végértéke most a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s=0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s=0} s \cdot W_{PI+FS}(s) \cdot \phi_{ref}(s) = \lim_{s=0} W_{PI+FS}(s) = \lim_{s=0} \frac{K_{FS}(sK_c T_I + 1)(sT_1 + 1)A}{s^2 T_I (sT_2 + 1)(1 + sT + K_s A) + K_{FS}(sK_c T_I + 1)(sT_1 + 1)A} = 1.$$

Az UAV dőlési szög zárt szabályozási rendszerének átmeneti függvénye – különféle  $K_{FS}$  értékek esetére – a 33. ábrán látható.



33. ábra. A dőlési szög szabályozó rendszer átmeneti függvénye.

Az értekezésben alkalmazott  $K_{FS} = 200$  érték helyett, amelynek hagyományos megvalósítása csak aktív elemeken lehetséges, válaszolva a kifejezetten az erősítés értékére vonatkozó kérdésre, most egytől kisebb értékű  $K_{FS}$  erősítéseket alkalmaztam, annak érdekében, hogy az előszűrő gyakorlatilag passzív áramkörü elemek segítségével is megvalósítható legyen.

Úgy a 'PI', mint 'PI+FS' szabályozók alkalmazásakor a motiváció a külső zavarások (pl. állandó oldalszél) elleni védelem javítása volt.

A továbbiakban vizsgáljuk meg az UAV zárt szabályozási rendszerének viselkedését külső zavarások hatása alatt. A külső zavarás most legyen  $D(t) = 1(t)$ , vagyis  $D(s) = 1/s$ .

A zárt szabályozási rendszer (7.2. ábra) külső zavarásra vonatkozó eredő átviteli függvénye most a következő lesz:

$$W_D(s) = \frac{\phi(t)}{D(t)} = \frac{A}{s(1+sT+K_s A)+K_c A},$$

amely alapján a dőlési szög külső zavarásra adott válaszfüggvényének végértéke most a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s=0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s=0} s \cdot W_D(s) D(s) = \lim_{s=0} W_D(s) = \lim_{s=0} \frac{A}{s(1+sT+K_s A)+K_c A} = 1/K_c.$$

A  $Y_c = K_c + \frac{1}{sT_I}$  PI-szabályozó alkalmazása esetén a zárt rendszer átviteli függvénye

$$W_D(s) = \frac{\phi(t)}{D(t)} = \frac{sT_I A}{s^2 T_I (1+sT+K_s A) + A(sK_c T_I + 1)}$$

alakú lesz, és a dőlési szög külső zavarásra adott válaszfüggvényének végértéke a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s=0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s=0} s \cdot W_D(s) D(s) = \lim_{s=0} W_D(s) = \lim_{s=0} \frac{sT_I A}{s^2 T_I (1+sT+K_s A) + A(sK_c T_I + 1)} = \frac{0}{A} = 0.$$

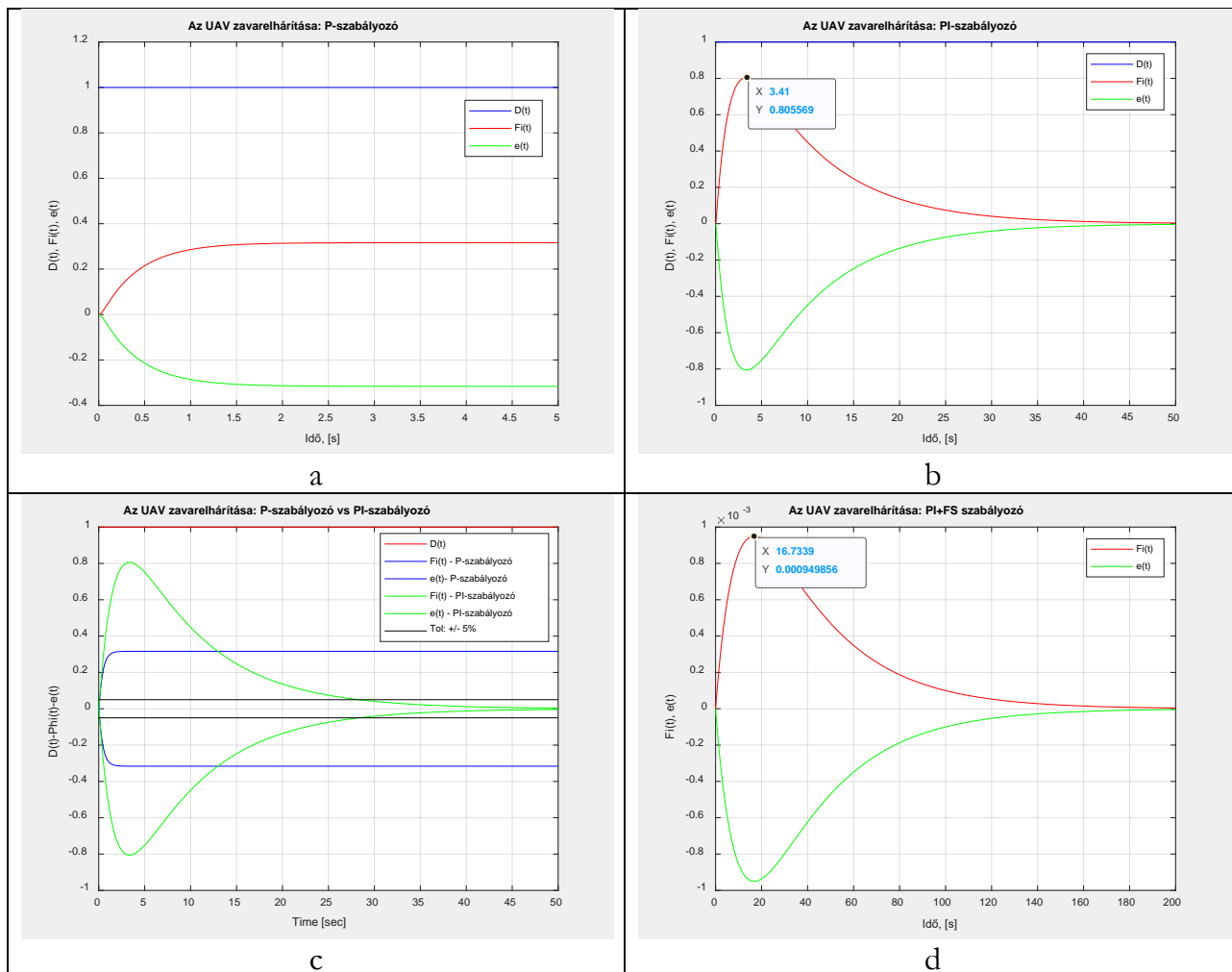
Végezetül, az  $Y_c = K_{FS} \cdot \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \left( K_c + \frac{1}{sT_I} \right)$  alakú 'PI+FS' soros kompenzátor esetén a külső zavaró jelre vonatkoztatott eredő átviteli függvény a következő lesz:

$$W_D(s) = \frac{\phi(t)}{D(t)} = \frac{sT_I A(1+sT_2)}{s^2 T_I(1+sT+K_S A)(1+sT_2)+K_{FS} A(sK_c T_I+1)(1+sT_1)}$$

amely átviteli függvény segítségével az UAV dőlési szöge külső zavarásra adott válaszfüggvényének végértéke a következő lesz:

$$\phi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \phi(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_D(s) D(s) = \lim_{s \rightarrow 0} W_D(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sT_I A(1+sT_2)}{s^2 T_I(1+sT+K_S A)(1+sT_2)+K_{FS} A(sK_c T_I+1)(1+sT_1)} = \frac{0}{K_{FS} A} = 0.$$

A rendszervizsgálat eredményeit a 34. ábrán láthatjuk.

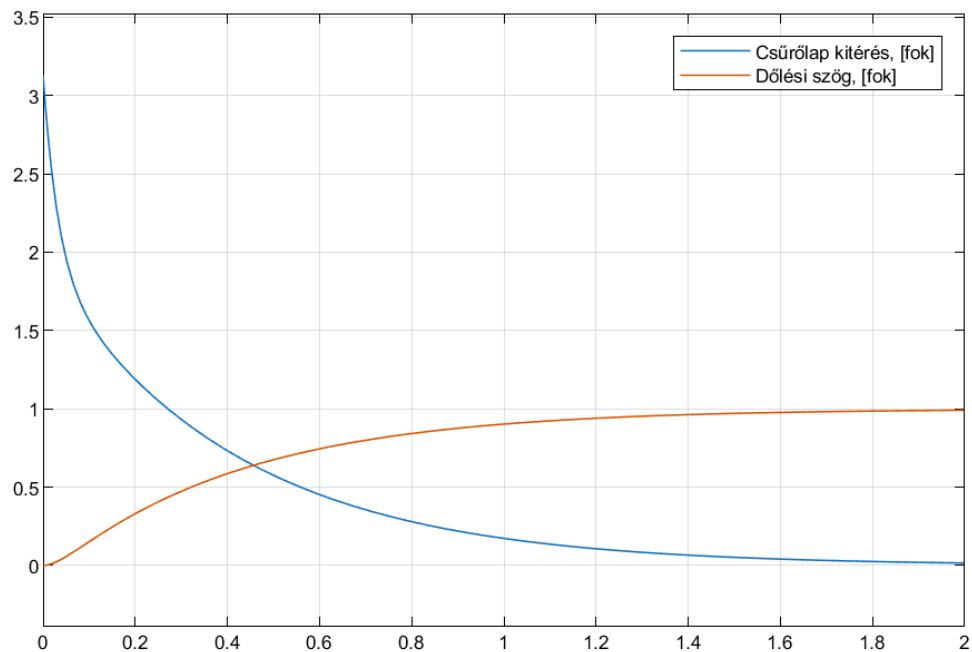


34. ábra. UAVdőlési szög stabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata.

A 33. ábrán látható eredmények rövid értékelése:

1. A 34.a. ábrán jól látható, hogy a P-szabályozó csak statikus hibával képes megtartani a  $\phi_{ref} = 0$  szögértéket. A statikus hiba a  $K_c$  erősítés növelésével csökkenthető.
2. a 34.b. ábrán látható, hogy a PI-szabályozó kiküszöböli a külső zavarás nemkívánatos hatását, de egyben lassítja is a zárt rendszer működését (31. ábra);
3. a 34.c. ábrán összehasonlíthatjuk a 'P' és a 'PI' soros jelformálókkal működő rendszerek zavarelhárító képességét;
4. a 34.d. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a 'PI+FS' szabályozó is képes elhárítani a külső zavarást, és a külső zavarás a rendszert csak nagyon kis mértékben téríti el a zérus értékű bedöntési szögtől: a dőlési szög maximális értéke  $\phi_{max}(t) = 9,49856 \cdot 10^{-4}$  fok, amely gyakorlatilag három nagyságrenddel kisebb, mint a PI-szabályozó esetén:  $\phi_{max}(t) = 8,05569 \cdot 10^{-1}$ .

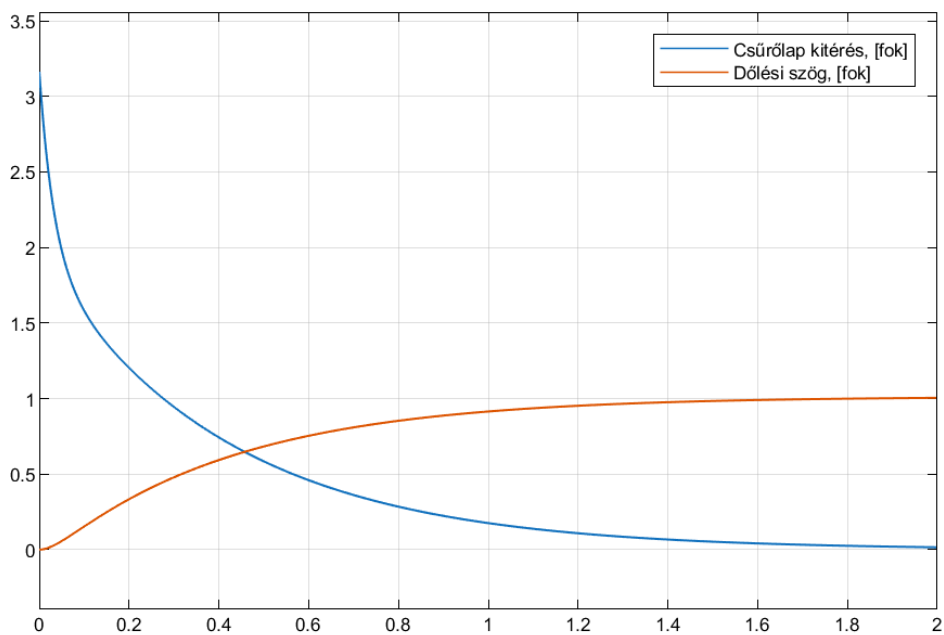
A vizsgált UAV csűrőlap kitéréseit a MATLAB® Simulink™ program segítségével határoztam meg. A vizsgálat eredményeit a 35. (P-szabályozó), a 36. (PI-szabályozó), és a 37. ábrán (PI+FS szabályozó).



35. ábra. A Trainer-60 SUAV csűrőlap kitérése P-szabályozó esetére.

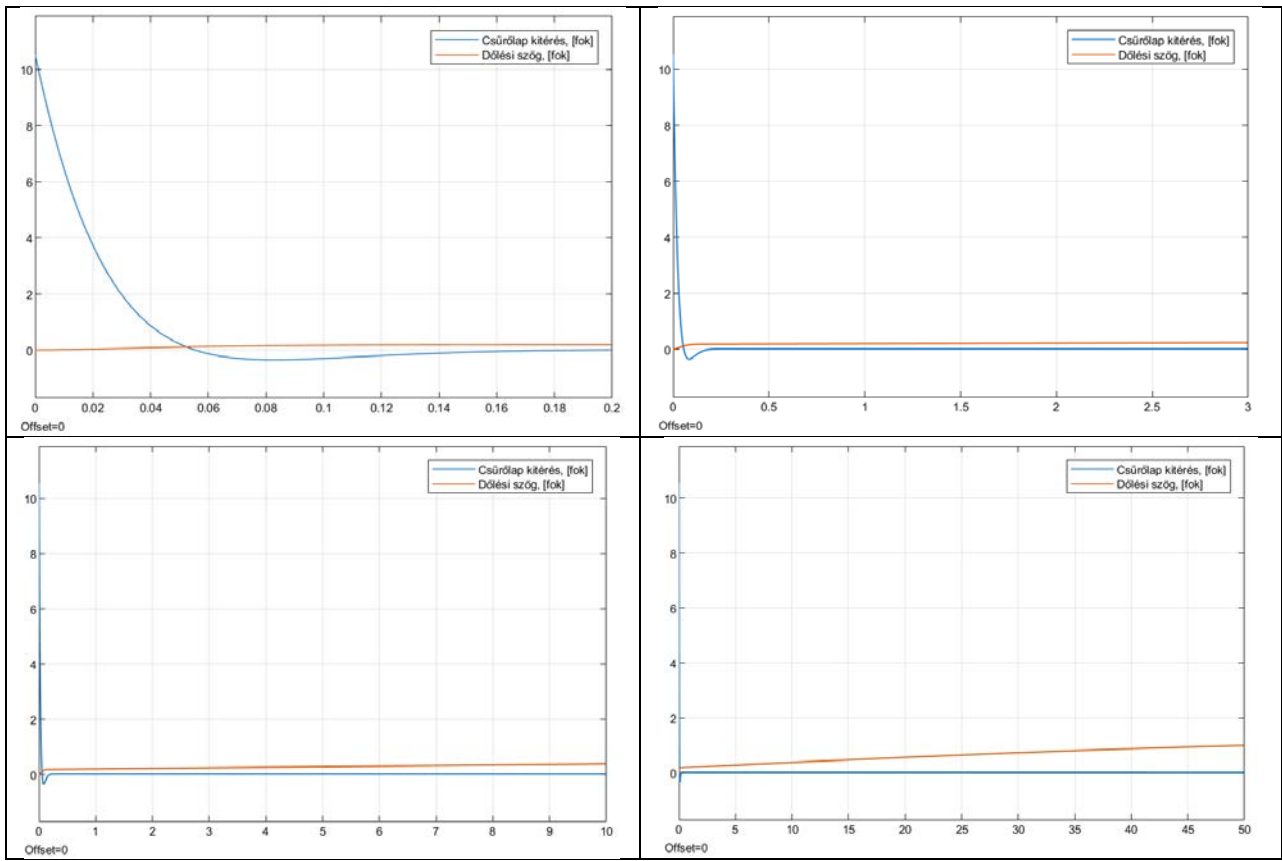
A 35. ábra alapján az alapjel követési feladat megoldása során a szükséges csűrőlap kitérés eléri a  $\delta_a \cong 3,2$  fokot, amit az Trainer-60 UAV meg tud valósítani.

A 36. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a csűrőlap kitérés szükséglet érdemben nem változott.



36. ábra. A Trainer-60 SUAV csűrőlap kitérése PI-szabályozó esetére.

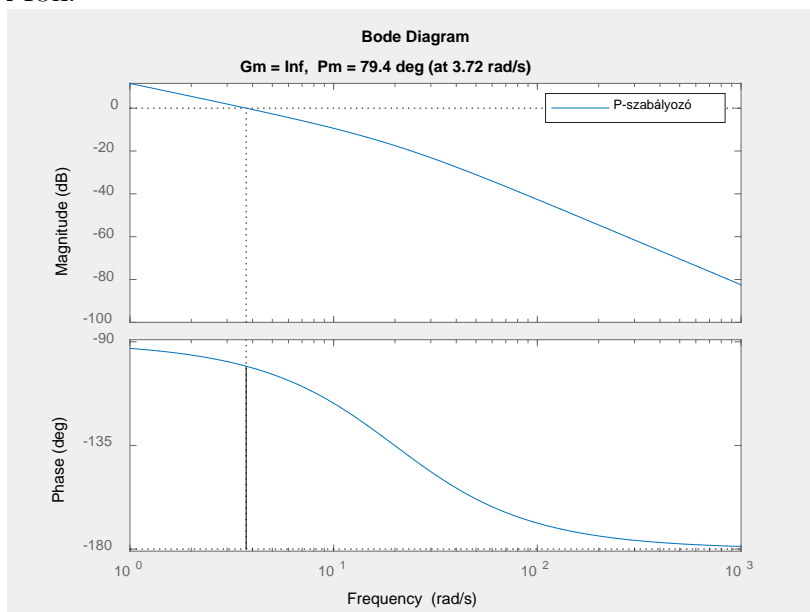
A 37. ábrán jól látható, hogy a 'PI+FS' szabályozó használata esetén a csűrőlap maximális kitérése  $\delta_a \cong 10,5$  fok, amit az UAV létre tud hozni, az alapjel követés tehát nem igényli a csűrőlapok extrém kitérítését.



37. ábra. A Trainer-60 SUAV csűrőlap kitérése 'PI+FS' szabályozó esetére.

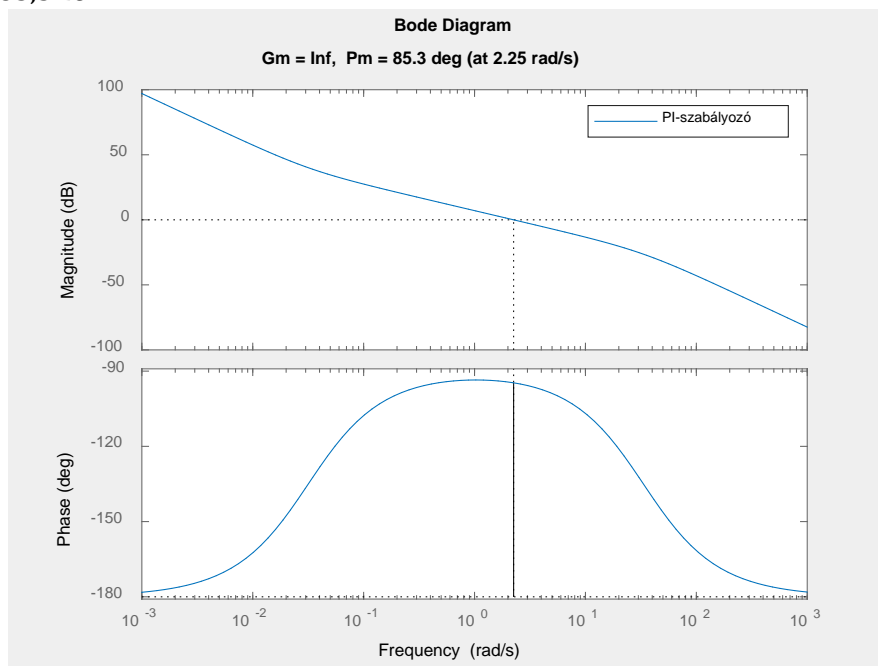
A különféle szabályozók alkalmazása természetesen érdemben befolyásolja úgy az erősítés-, mint a fázistartalék értékeket. A különféle szabályozóval működő felnyitott szabályozási körök Bode diagramjai a 38.-40. ábrákon láthatók.

A 38. ábrán a P-szabályozóval működő rendszer Bode diagramja látható. A rendszer erősítési tartaléka  $\phi_t = 79,4$  fok.



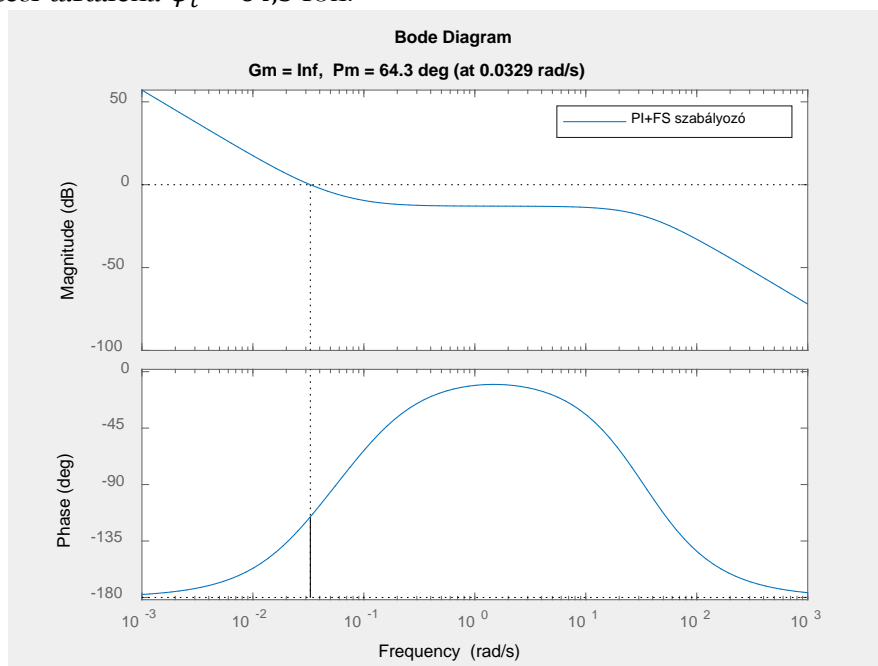
38. ábra. Felnyitott szabályozási kör frekvenciafüggvénye.

A 39. ábrán a PI-szabályozóval működő rendszer Bode diagramja látható. A rendszer erősítési tartaléka  $\phi_t = 85,3$  fok.



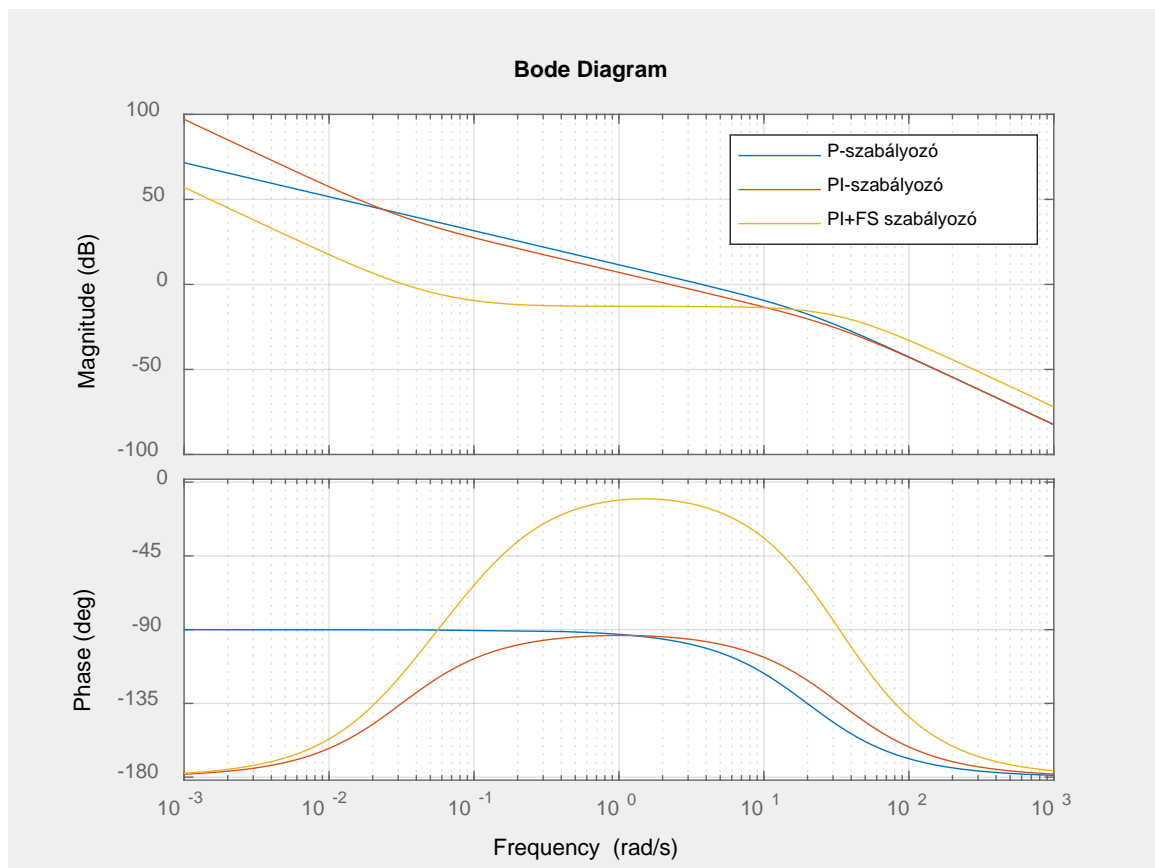
39. ábra. Felnyitott szabályozási kör frekvenciafüggvénye.

Végezetül, a 'PI+FS' szabályozóval működő rendszer Bode diagramja a 40. ábrán látható. A rendszer erősítési tartaléka  $\phi_t = 64,3$  fok.



40. ábra. Felnyitott szabályozási kör frekvenciafüggvénye.

A három különféle szabályozóval működő rendszer minőségi jellemzőit a 41. ábra segítségével hasonlíthatjuk össze.



41. ábra. A felnyitott szabályozási körök frekvenciafüggvénye.

### Kérdés

- A 7.22 ábrán feltüntetett állapot visszacsatolás mikor lehet referenciajel követő? Mi a (7.46-7.49) egyenletek megoldási sorrendje?  $\delta$   $\xi$ -től függ, az meg  $\delta$ -tól. Ráadásul (7.46)-ba (7.47)-et behelyettesítve  $\sin\delta$  adódik nem tangens. A (7.55) és (7.56) egyenletek azt mutatják, hogy a tervezési módszer a stabil póluspár helyben hagyása és a 0 pólus elmozdítása negatív irányba. A kérdés, hogy az integrátorhoz tartozó bólintási szög dinamikát miért kell gyorsabbra venni a szögsebesség-sebesség dinamikánál? Az ebből adódó túlszabályozást aztán a Szerző is látja a (7.25) ábrán: "A 7.25. ábrán jól látható, hogy az

egységnyi bólintó szög bemenetre adott rendszerválasz nagy túlszabályozással működik, ami még az UAVk esetében sem megengedett." Ugyanakkor nem történik meg a rendszer újrahangolása és a kormánykitérések elemzése se. Így kérem az újrahangolást kisebb bólintási szög túllövés elérésig és a Trainer-60 UAV kitérési korlátainak megfelelő magassági kormánykitérés maximumok betartásáig (jó eséllyel a rendszer ezeket most nem tartja be). Ezen túl mutasson rá, hogy az egyszerű állapot visszacsatolás ellenére miért követi a rendszer mégis a bólintási szög referenciát!

**Válasz:** A (7.22) ábrán bemutatott többváltozós rendszer akkor referencia jel követő, ha  $\mathbf{u} = \mathbf{r} - \mathbf{K}\mathbf{x} = 0$ , vagyis  $\mathbf{r} = \mathbf{K}\mathbf{x}$ .

A (7.46)-(7.49) egyenletek ellenőrzés után az alábbiak lesznek:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega_d}{\sigma_0} = \frac{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}}{\xi \omega_0} = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} = \sqrt{\frac{1-\xi^2}{\xi^2}} = \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1} \quad (7.46)$$

$$\cos \delta = \frac{\sigma_0}{\omega_0} = \sigma_0 T = \xi \quad (7.47)$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\pi T}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (7.48)$$

$$t_s = \frac{3}{\sigma_0} = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (7.49)$$

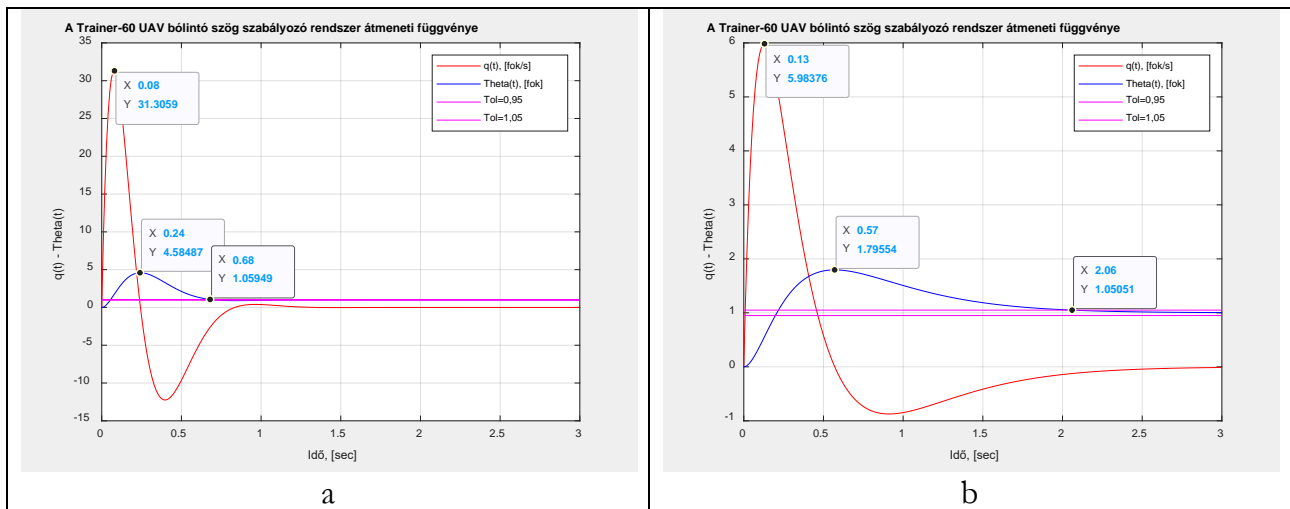
A pólus allokációs szabályozótervezés során a zárt szabályozási rendszer kívánt pólusait a

$$p_{1,2} = -6 \pm 6j \quad (7.55)$$

$$p_3 = -10 \quad (7.56)$$

értékekkel vettem fel. A pólusok felvételekor a domináns póluspár elvét követtem, vagyis a teljes zárt szabályozás dinamikáját főként a  $p_{1,2} = -6 \pm 6j$  póluspár határozza meg (42.a. ábra). A fenti pólusok elhelyezkedését biztosító zárt szabályozási rendszer teljes állapot-visszacsatolás mátrixa a következő alakban adható meg:

$$\mathbf{K}_1 = [2.4123 \quad -0.5929 \quad -53.0745]$$



42. ábra. Az UAV zárt szabályozási rendszerének viselkedése.

A 42.a. ábrán a belső hurokban a bólintó szögsebesség maximális értéke  $q_{\max}(t) = 31,3059$  fok/s, ami agilis, közel agresszív viselkedést jelent. A belső hurokban a bólintó szögsebesség maximális értékének csökkentése érdekében a zárt szabályozási rendszer pólusait a komplex síkon az alábbi helyekre allokáljuk:

$$p_{1,2} = -3 \pm 0,1j$$

$$p_3 = -10$$

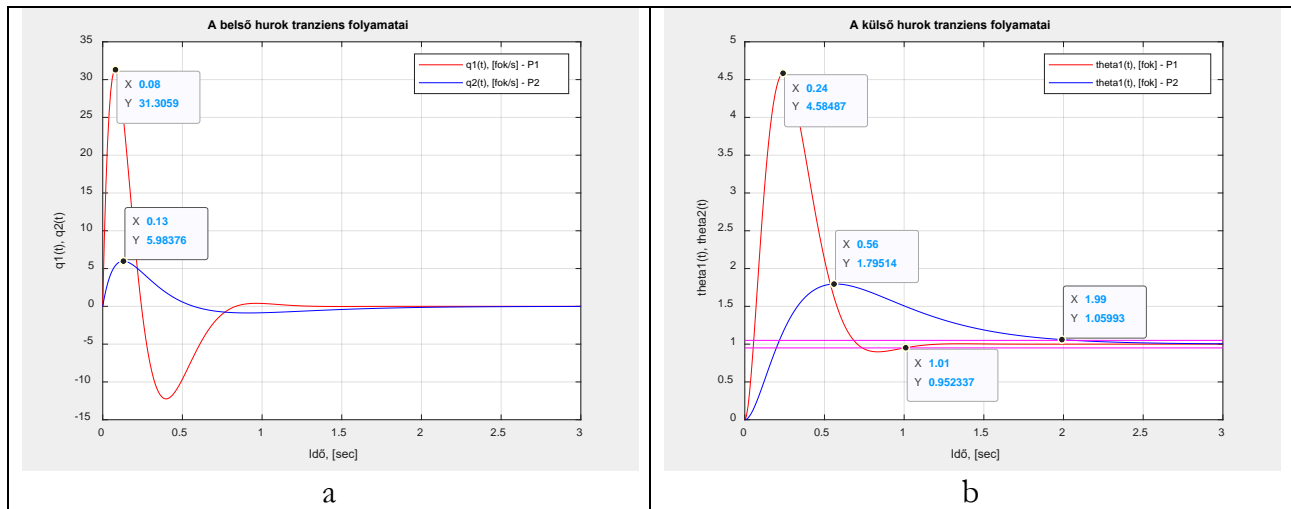
A zárt szabályozási rendszer fenti kívánt pólusait az alábbi teljes állapot-visszacsatolás mátrix biztosítja:

$$\mathbf{K}_2 = [0.3909 \quad -0.1340 \quad -6.6416]$$

Az újra hangolt zárt szabályozási rendszer átmeneti függvényei a 42.b. ábrán láthatók. Mint az az ábrán jól látható, a bólintó szögsebesség maximális értékét lényeges mértékben sikerült csökkenteni, amelynek az értéke most  $q_{\max}(t) = 5,98376$  fok/s.

Összevetve a két szabályozási rendszer  $\mathbf{K}_1$  és  $\mathbf{K}_2$  állapotvisszacsatolási mátrixait, megállapíthatjuk, hogy a javuló minőséget úgy értük el, hogy eközben csökkentek az erősítési tényezők is.

Az UAV bólintó szög stabilizáló rendszer belső, és külső hurokjának viselkedését a 43.a., és a 43.b. ábrákon láthatjuk. Az újra hangolt rendszer mindkét hurokjában lényeges minőségi javulást értünk el.



43. ábra. A bólintó szög szabályozó rendszer átmeneti folyamatai.

Mint ahogyan korábban már említettem, a szabályozó megtervezésekor nem az volt a cél, hogy egy adott UAV típusra alkalmazható beállításokat találjak (egyébként még a mai napon sem létező tervezési-minőségi kritériumok mellett), hanem olyan környezet fejlesztése, amelyben minden UAV robotpilótát fejlesztő szakember a saját igényei és a saját elvárásai (és egy, remélhetőleg a közeljövőben megalkotandó követelményrendszernek megfelelően) szerint módosítja a tervezéshez kifejlesztett MATLAB® kódot.

A (7.52) állapot-egyenlet alapján, ha a teljes állapot-visszacsatolású zárt szabályozási rendszer külső hurokjában azt felnyitjuk, akkor a 'bólintó szögsebesség-bólintó szög' közötti integráló kapcsolat miatt a szabályozás I-típusú, ezért az I-típusú bemeneti jelet, mint amilyen az egységugrás bemeneti jel is, maradó hiba nélkül leköveti.

## Kérdés

- (7.58) egyenlethez kapcsolódóan mit tud mondani az LQR módszer referencia követéséről? Ugyanerre a rendszerre ugyanennek az LQ erősítésnek a tervezését már elvégezte (7.4)-ben. Mi az oka, hogy most más súlyozást használt és fordított előjellel adódtak az erősítés értékek (7.90)? (7.92) aztán már a (7.4)-ben adott erősítéseket adja, csak fordított előjellel. Mi az előjel fordítás oka? És (7.91) hogyan teljesíti a (7.96) alatt megadott feltételeket? A 7.28 és 7.29 ábrák kapcsán is szükséges a kormánykitérések elemzése, hogy a Trainer-60 UAV korlátait betartják-e? Tehát kérem ennek elvégzését, bár érdekes módon a -31-es pólustól elvárt nagyon gyors transziens az ábrákon nem látható.

**Válasz:** A LQR módszerrel tervezett LQ-erősítések által biztosított referencia jel követése a szabályozási rendszer–, valamint a referencia jel típuszáma határozza majd meg. Általános szabályként elmondható, hogy egy adott típuszámú szabályozási rendszer az alacsonyabb, és az azonos típuszámú referencia jelet maradó hiba nélkül átviszi, az eggyel magasabb típuszámú jelet maradó hibával viszi át, míg a kettővel magasabb típuszámú referencia jelet nem képes átvinni.



Az értekezés 7.1. fejezetében bemutatott szabályozótervezést a (7.2) oldalirányú mozgást

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19,9149 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -23,8289 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_a, \quad (7.2)$$

figyelembe véve, és tekintettel a Bryson-szabály ismeretek és adatok hiánya miatti alkalmazhatatlanságára, az első tervezést egységnyi súlyokra hajtottam végre, majd további heurisztikus hangolás után a

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = 1 \quad (7.3)$$

súlyokra, a  $\mathbf{K}$  teljes állapot-visszacsatolási mátrix, és a  $\mathbf{P}$  költségmátrix a következő volt:

$$\mathbf{K} = [\mathbf{K}_s \quad \mathbf{K}_c] = [0.5656 \quad 3.1623]; \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.0237 & 0.1327 \\ 0.1327 & 4.4316 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Az értekezés 7.3. fejezetében alkalmazott súlyok az alábbiak voltak:

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_2 = 1 \quad (7.91)$$

és a  $\mathbf{K}_2$  teljes állapot-visszacsatolási mátrix, és a  $\mathbf{P}_2$  költségmátrix a következő volt:

$$\mathbf{K}_2 = [-0.5656 \quad -3.1623]; \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 0.0237 & 0.1327 \\ 0.1327 & 4.4316 \end{bmatrix} \quad (7.92)$$

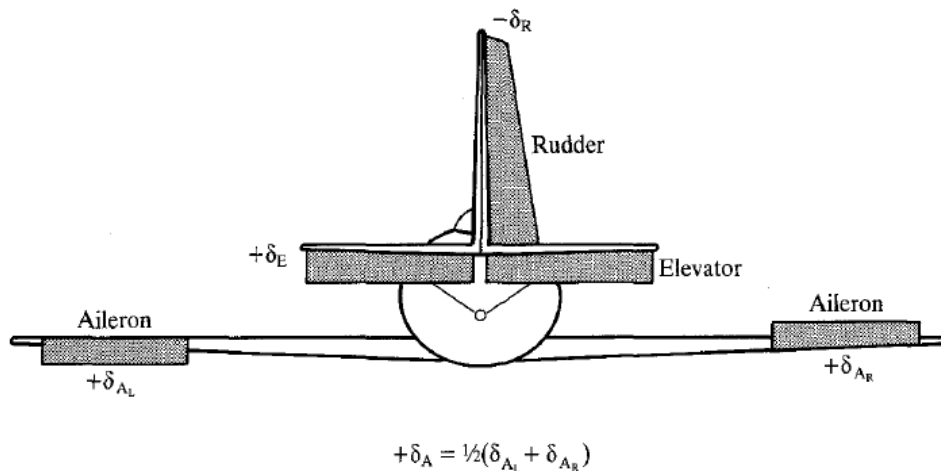
Az előjel váltások oka az volt, hogy az oldalirányú mozgás

$$\dot{p} + 19,9149p = -23,8289 \cdot \delta_a$$

differenciálegyenletében a jobboldalon a csűrőlapok  $\delta_a$  kitérése negatív előjellel áll (7.1. fejezet), amit a 7.3. fejezetben '+'-ra változtattam, és ennek magyarázata – sajnálatos módon – elmaradt.

A 44. ábrán (D. McLean, 1990.) láthatjuk a légijárművek elsődleges kormányfelületeinek pozitív mérőirányait.

Az előjelesség a hossz tengely körüli orsózó mozgásban azt jelenti, hogy lehetséges a jobbra, vagy a balra fordulás (orsózás) a hossz tengely körül, és megfelelő irányú orsózáshoz a megfelelő irányú csűrőlap kitérést hozzuk létre.

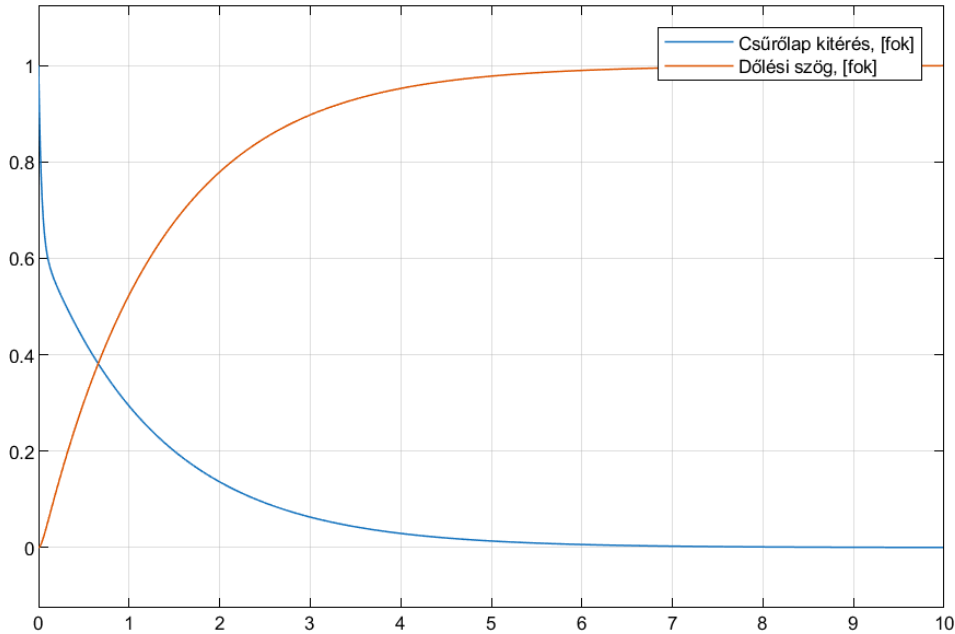


**Figure 1.4 Control surface deflection conventions.**

44. ábra. Kormányfelületek előjeles kitérésének irányai.

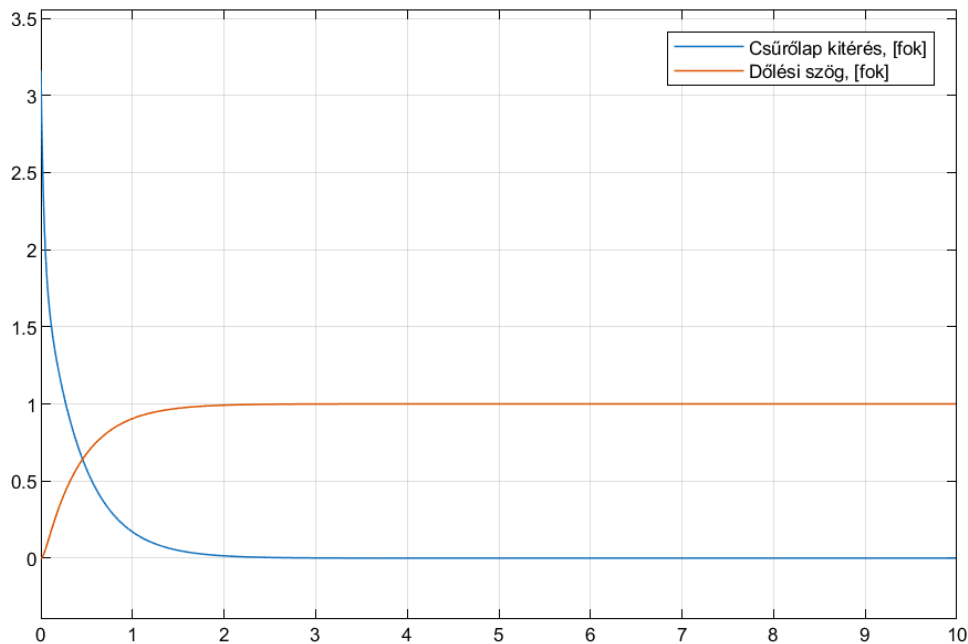
A (7.96) integrálkritérium LQR-tervezési fázisához a (7.106) egyenlettel új súlyozást alkalmaztam.

7.28. ábrán látható eredményeket kiegészítve a csűrőlapok  $\delta_a$  szögkitérésével (45. ábra), megállapíthatjuk, hogy az egységnyi súlyozással tervezett zárt szabályozási rendszer alapjelkövetésekor a csűrőlapok maximális kitérése  $\delta_a \cong 1 \text{ fok}$ , tehát ez az érték nem lépi túl a csűrőlapok lehetséges kitérésének korlátait.



45. ábra. Dőlési szög stabilizáló rendszer tranziens folyamatai.

A 7.29. ábrán látható eredményeket kiegészítve a csűrőlapok  $\delta_a$  szögkitérésével (46. ábra), megállapíthatjuk, hogy az egységnyi súlyozással tervezett zárt szabályozási rendszer alapjelkövetésekor a csűrőlapok maximális kitérése  $\delta_a \cong 3,3 \text{ fok}$ , tehát ez az érték sem lépi túl a csűrőlapok lehetséges kitérésének korlátait.



46. ábra. Dőlési szög stabilizáló rendszer tranziens folyamatai.

## Kérdés

- Az LQG tervezés meg tudja oldani a determinisztikus zavarások kompenzálását is? A 7.32 ábrán felrajzolt rendszerben mit tud mondani az  $x_{ref}$  referencia követéséről? Fogja követni a rendszer? Milyen feltételekkel? Mekkora hibával? A (7.106)-ban megadott súlyok szélsőségesen extrém értékeket képviselnek, hogyan határozta meg őket? A 7.34 ábra szcrint a  $w$  sebesség gyorsan és elfogadható túllendüléssel áll be, de hogyan viselkedik eközben a  $q$  szögsebesség és a magassági kormány? Utóbbi betartja a Trainer-60 UAV rendszerhatárait? Vizsgálja meg, hogy melyik dinamikához (kontroller, vagy Kálmán szűrő) tartoznak a gyors  $-296$  és  $-1260$  és a lassú  $-10,4 \pm 7i$  pólusok! Eleget tesz így a rendszer a követelménynek, hogy a szűrő (állapotbecslő) gyorsabb legyen, mint a szabályzó?

**Válasz:** Az LQG-szabályozó tervezésekor alapvetően az  $x_{ref} = w_{ref} = 0$  bemenettel számolunk, és az szabályozó feladata a külső és a belső zajok ellenében is megtartani a zérus referencia jelet.

A szabályozótervezéskor a dolgozatban használt nagyértékű súlyozó mátrixok helyett új súlyozómátrix rendszert vettem fel, amelyekkel a rendszert újra terveztem. A súlyozó mátrixok most az alábbiak lesznek:

Az 'LQR' szabályozó tervezése:

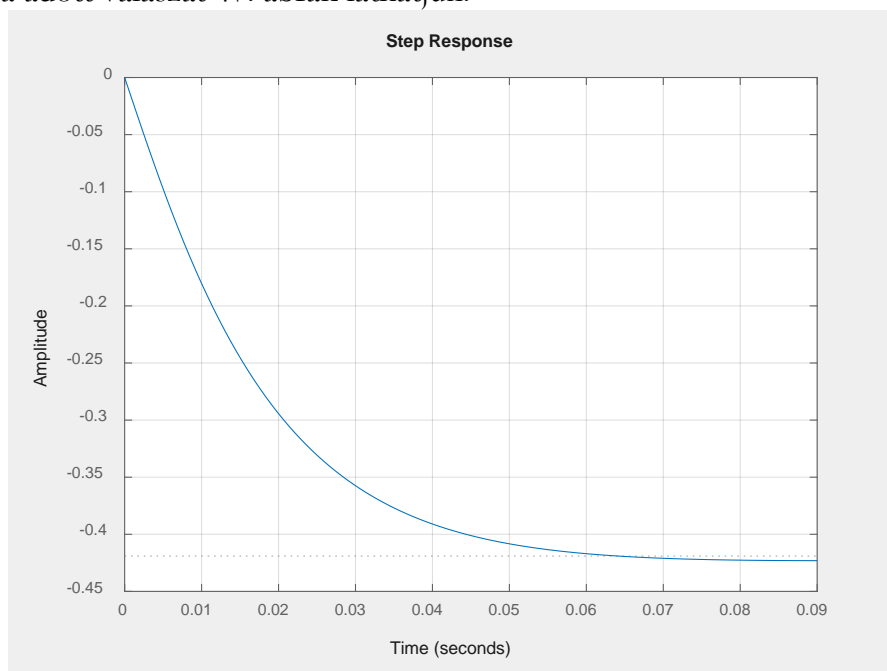
A tervezéshez az 'lqry.m' függvényt használtam a

$$Q = 10, R = 0,1$$

súlyokkal, míg az 'LQE' Kálmán-szűrő tervezésére a 'kalman.m' függvényt az alábbi súlyokkal alkalmaztam:

$$Q_0 = 1, R_0 = 0,01$$

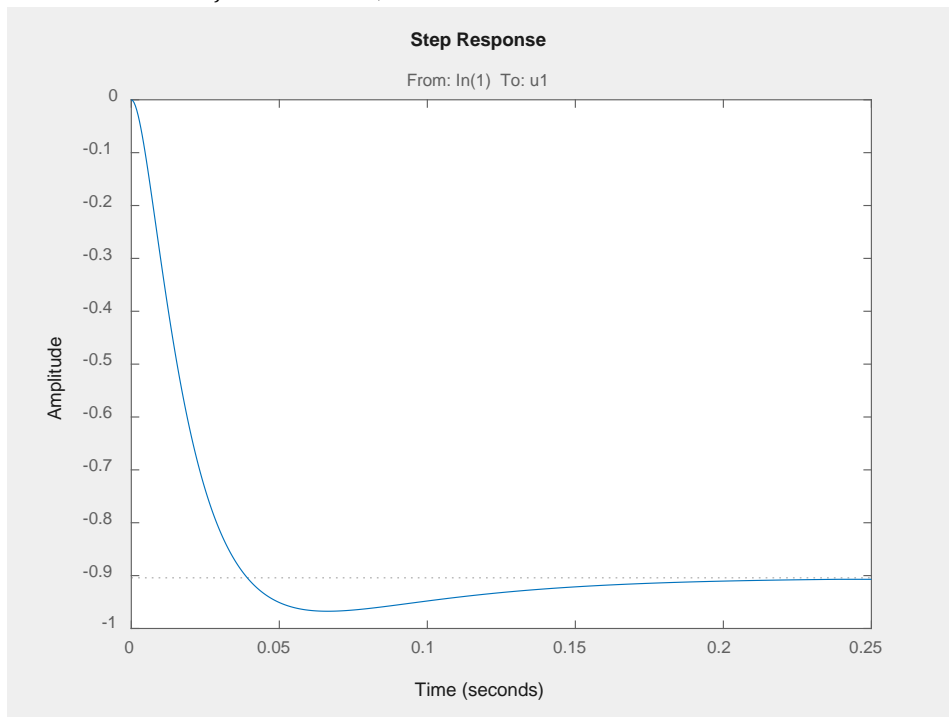
Az LQG-szabályozóval működő zárt szabályozási rendszernek az egységugrás determinisztikus külső zavarásra adott válaszát 47. ábrán láthatjuk.



47. ábra. Az UAV sebességstabilizáló rendszerének zavarelhárítása.

A 47. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a dinamikus LQG-szabályozó csak maradó hibával képes megtartani a  $w_{ref} = 0$  sebességértéket.

Az LQG-szabályozóval működő zárt szabályozási rendszer válasza a  $w_{ref} = 1 * 1(t)$  bemeneti jelre a 48. ábrán látható. A 48. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a dinamikus szabályozó csak maradó hibával követi a  $w_{ref}$  referencia jelet.



48. ábra. Az UAV sebességstabilizáló rendszerének referencia jel követése.

A (7.106) súlyokat – az első, nem megfelelő minőséget biztosító egységnyi súlyozás után – heurisztikus úton vettem fel.

A Kálmán-szűrőhöz tartozó  $-296$  és a  $-1260$  gyors pólusok lényeges gyorsabb szűrődinamikát jelentenek, mint a  $-10,4 + 7i$  lassú dinamikát meghatározó controller domináns pólusok.

## Kérdés

- (7.111) alatt említésre kerül az ismeretlen eredetű parancsjel. Ezt hogyan definiálhatjuk? (7.121) felett eltávolítja a mérési zajokat a rendszerből. Miért? Azokkal együtt nem megoldható a  $\mathcal{H}_2$  tervezés? (7.119) SISO, vagy MIMO rendszerre vonatkozik? Ezt figyelembe véve pontos-e a megadott formula? (7.125) figyelembe vételével a  $v_1$  zavarás tulajdonképpen a rendszer inputjára hat. Miért nem direktben oda lett felvéve ez a változó? A zárt hurok megtervezése után még mindig korrekt így a bemeneti zavarás hatásának modellezése? (7.129) egyenlethez és 7.38 ábrához jutva már minden zavarás eltűnik a rendszerből, ráadásul (7.131) már csak egy sima 1 tárolós, arányos átviteli függvény. Mi indokolja ezt és miért szükséges ilyen egyszerű rendszerre  $\mathcal{H}_2$  tervezés alkalmazása? Miért nem elegendő a 7.1 részben bemutatott PI tervezés (ahol ráadásul figyelembe vette a determinisztikus zavarás hatását)? (7.133) súlyozó mátrixait miért ilyen módon (milyen megfontolások mentén) választotta meg? A 7.38 ábra és a felírt egyenletek fényében hogyan értelmezendő a  $T_{z_1} w_1$  átviteli függvény? A 7.39 ábra mellé kérem a csűrőkormány kitérések megjelenítését is!

### Válasz:

A (7.111) egyenletben az 'ismeretlen eredetű parancsjel' lehet például a bemeneti irányító jelre szuperponáló jel.

A  $H_2$ -tervezés megoldható a mérési zajok figyelembevételével is. Az  $v$  mérési zajok eliminálását a  $V_2 = 0$  szűrővel H. Kwakernaak<sup>30</sup> javasolta. Ezt a feltételt szakirodalmi hivatkozással vettem át.

Általános esetben, a (7.119) képlet MIMO-rendszerre vonatkozik ( $S(s)$  és  $T(s)$  mátrixok), de SISO-rendszerekre is ugyanez a formális alak használható, amikor  $S(s)$  és  $T(s)$  SISO átviteli függvények. Az értekezésben az  $S(s)$  és  $T(s)$  definiálásakor elmaradt, hogy MIMO-rendszerek esetén mind a két függvény mátrix.

A Trainer-60 SUAV (7.131) állapotegyenlettel megadott oldalirányú mozgásdinamika<sup>31</sup> nem tartalmaz sem külső zavarást, sem pedig belső mérési zajt. A külső, főként a légköri turbulenciát reprezentáló sztochasztikus (esetleg determinisztikus, pl. állandó oldalszél) zavarás jellemzőinek felvételéhez szükségesek a repülés valós időjárás minimumainak ismerete, ami a mi esetünkben nem volt adott.

A  $H_2$ -tervezést, hasonlóan a többi tervezési módszerhez, azért alkalmaztam egy viszonylag egyszerű rendszerre, mert az alkalmazásához készült egy MATLAB-script, ami gazdagítja a tervezési algoritmusok bemutatására létrehozott függvénykönyvtárat.

A  $H_2$ -tervezést bemutató példában (dőlési csillapító automata) a (7.131) alakú SISO átviteli függvény széles körben alkalmazott, mint például az oldalirányú mozgás robotpilótáinak tervezését taglaló<sup>32</sup>, és PI-szabályozókra épülő, útirányszög stabilizáló rendszerben (49. ábra, belső hurok).

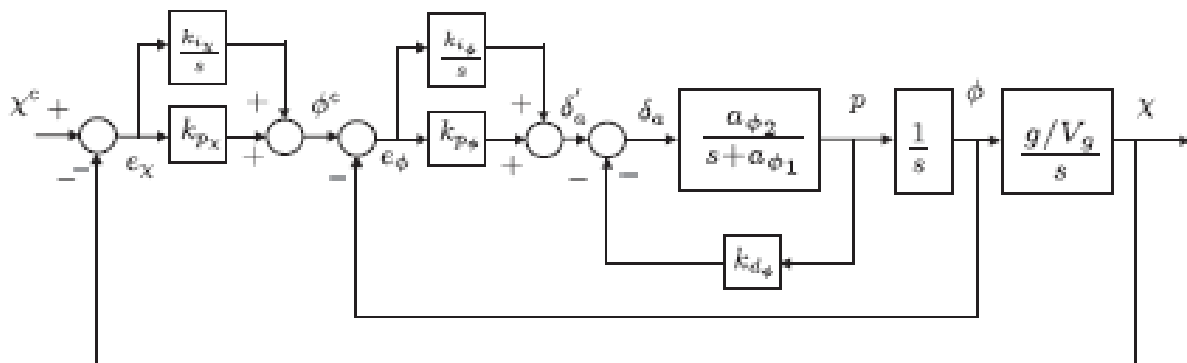


Figure 6.6 Autopilot for lateral control using successive loop closure.

49. ábra. Az oldalirányú mozgás repülési paramétereinek többhurokú szabályozása.

A (7.133) egyenlet javított indexeléssel a következő lesz:

$$W_1 = 2; W_2 = \frac{10}{10+s}; \quad (7.133)$$

H. Kwakernaak a  $W_1$  szűrő értékére első lépésben a  $W_1 = 1$  értéket javasolta. A zárt szabályozási rendszer minőségének biztosítása érdekében ezt az értéket tovább hangoltam a  $W_2$  szűrőre.

<sup>30</sup> H. Kwakernaak (2002).  $H_2$ -Optimization – Theory and Applications to Robust Control Design. *Annual Reviews in Control*, 26, 45-56.

<sup>31</sup> Eng, P. C. S. *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing*. PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2011.

<sup>32</sup> R. W. Beard, T. W. McLain: *Small Unmanned Aircraft*, Princeton University Press, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012.

Szintén H. Kwakernaak javasolta a  $W_2(s) = \frac{\rho s}{s+\alpha}$  általános alakú súlyozó átviteli függvény alkalmazását, amely helyett én a  $W_2(s) = \frac{\alpha}{s+\alpha}$  alakú súlyozó átviteli függvényt használtam, annak heurisztikusan behangolt  $W_2 = \frac{10}{10+s}$  alakjával.

A  $T_{z_1 w_1}(s)$  átviteli függvény – felhasználva a 7.38. ábrát és a (7.132) egyenleteket – helyesen a  $T_{z_1 w}(s)$  alakban írható fel.

## Kérdés

- (7.144) biztos, hogy a T átviteli függvény mátrix sajátértékét maximálja? (7.147-7.150) esetében megint az a kérdés, hogy SISO, vagy MIMO reprezentációról van-e szó és ezt figyelembe véve pontos-e a megadott formula? 171. oldal: "robosztus lesz, amely képes minimálni, vagy teljesen kiszűrni a mérési zajok zárt szabályozásra gyakorolt hatását." Mi a kapcsolat a robosztusság és a zajszűrés között? A 7.40 ábra milyen módosítása szükséges egy robosztus szabályzó tervezéséhez? A 7.42 ábra és a (7.152) súlyozó függvények teljesen azonosak a 7.38 ábrával és (7.133) súlyozó függvényekkel. Mi ennek az oka? A

másféle normára való szabályzó tervezés miért nem teszi szükségessé a súlyozó függvények módosítását? A 7.42 ábra mellé kérem a csűrőkormánykitérés megjelenítését és a Trainer-60 határai szempontjából való értékelését is!

**Válasz:** A (7.144) egyenlet helyesen:

$$\|T_{w \rightarrow z}(s)\|_{\infty} = \max_{\omega \in \mathcal{R}} \|T_{w \rightarrow z}(j\omega)\|^2 = \max_{\omega \in \mathcal{R}} \bar{\sigma}(T_{w \rightarrow z}(j\omega))$$

ahol  $\bar{\sigma}$  a  $T_{w \rightarrow z}(j\omega)$  komplex átviteli függvény legnagyobb sajátértékét reprezentálja.

A (7.147)-(7.150) egyenletek MIMO rendszert reprezentálnak, és az elmaradt mátrix jelöléseket pótolva, helyes alakban az alábbiak lesznek:

$$T_{r \rightarrow e}(K) = \frac{1}{I+G(s)K(s)} \quad (7.147)$$

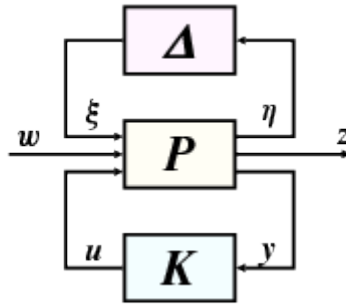
$$\|T_{r \rightarrow \tilde{e}}(K)\|_{\infty} = \left\| \frac{W_e}{I+G(s)K(s)} \right\|_{\infty} \quad (7.148)$$

$$T_{n \rightarrow \tilde{u}}(K) = -\frac{K(s)}{I+G(s)K(s)} W_u \quad (7.149)$$

$$\|T_{n \rightarrow \tilde{u}}(K)\|_{\infty} = \left\| -\frac{K(s)}{I+G(s)K(s)} W_u \right\|_{\infty} \quad (7.150)$$

A 172. oldalon hivatkozott 'robosztus' rendszertulajdonságot úgy értettem, hogy az  $S(s)$  érzékenység függvény megfelelően súlyozásával elérhetjük, hogy a nagyfrekvenciás tartományban, ahol a rendszer belső zajai megtalálhatóak, az érzékelők zajait egy felső korláttal, egy megfelelően megválasztott súlyozó átviteli függvényvel kellően kis értékeken tarthatjuk.

A 7.40 ábra egy teljes információs (FI), előre csatolt zavarásos (DF), kimenet visszacsatolt (OF) általános rendszerstruktúra, amelynek robosztusságát az alábbi ' $P - K - \Delta$ ' rendszerstruktúrában vizsgálhatjuk (50. ábra).



50. ábra. Általános rendszerstruktúra bizonytalansággal<sup>33</sup>.

Az 50. ábrán:  $\Delta$  a bizonytalansági mátrix,  $\xi$  és  $\eta$  a bizonytalanságot leíró jelek vektorai. A ' $P - \Delta$ ' viszonylatban – bár ez a jelenség kisméretű UAVkra nem, vagy csak elhanyagolhatóan kisméretben jellemző – a ' $\Delta$ ' blokk leírhatja a törzs, vagy a szárny aeroelasztikus mozgását, mint a ' $P$ ' rendszermodell additív bizonytalanságát.

A 7.42. ábra és a (7.152) súlyozás egyenlete akár elhagyható lett volna a dolgozatban, a 7.6. fejezetből a 7.5 fejezetre történő visszahivatkozással. A 7.38. ábrán bemutatott rendszer a  $H_2$ , míg a 7.40 ábrán bemutatott rendszert a  $H_\infty$  tervezési módszerek alkalmazását mutatja be.

A  $H_2$  tervezés során a

$$\|T_{z_1 w_1}(s)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \text{tr} \int_{-\infty}^{+\infty} T_{z_1 w_1}(-j\omega) T_{z_1 w_1}(j\omega) d\omega \rightarrow \text{Min} \quad (7.116)$$

kritériumot minimáló irányítást keressük<sup>34</sup>, míg a  $H_\infty$  tervezés során keressük azt a  $K(s)$  irányítást, amely biztosítja, hogy

$$\min_K \|T_{w \rightarrow z}(P, K)\|_\infty = \min_K \max_{\omega \in \mathcal{R}} \bar{\sigma}(T_{w \rightarrow z}(P, K)(j\omega))$$

legyen.

## Kérdés

- A 7.45 ábrán mit jelölnek a zöld-sárga-piros színek, és miért  $x$ -el jelölte a jövőbeli kimenetet? (7.205) egy állapot dinamikai egyenlet, ahol  $Y_d$  a  $d$  zavarás állapot deriváltakra való hatása. Ugyanakkor (7.206)-ban  $Y_d(s)$  átviteli függvény szerepel. Mi a kapcsolat a két felírás között? (7.207) szerint a rendszer időállandója  $T = 0.05s$  ennek figyelembe vételével (transziens felfutás ideje) mennyire megfelelő a  $\Delta t = 0.1s$  mintavételi idő alkalmazása? Mi a kapcsolat a  $\Delta t = 0.1s$  mintavételi idő és a 7.47 és 7.48 ábrákon szemmel láthatóan  $1s$ -onként változó jelszintek között? Az elért  $3-4s$  beállási idő indokoltá teszi-e az MPC módszer alkalmazását a sima PI szabályzóhoz képest, mely ugyanúgy képes volt a zavarást kompenzálni és gyorsabb is volt ennél (7.1 rész)? Az alkalmazási példában nem látom nyomát a [7.74] irodalom alapján ismertetett Laguerre bázist használó módszernek. Hol érhető tetten az alkalmazása, illetve ha nem került alkalmazásra annak mi az oka?

<sup>33</sup> Dr. Bokor József, Dr. Gáspár Péter, Dr. Szabó Zoltán: Irányításelmélet. BME MOGI, ISBN 978-963-313-175-6, 2014. <https://mogi.bme.hu/TAMOP/iranyitaselmelet/index.html>. Letöltve: 2024. 11. 20.

<sup>34</sup> H. Kwakernaak (2002).  $H_2$ -Optimization – Theory and Applications to Robust Control Design. *Annual Reviews in Control*, 26, 45-56.

**Válasz:** A 7.45 ábrán a színeket magam választottam, a színek szerepe a jó érthetőségre és a vizuális élményre korlátozódik. A 7.45. ábra bal oldalán 'zöld' színnel jelöltem a 'múlt'-ban megtörtént bemenet, és kimeneti jel változást. Az ábrán 'sárga' színnel az éppen aktuális 'jelen'-ben, a  $t = T$  időpillanatban lejátszódó, de a 'jövő'  $t = T + 1T$  időpontja felé mutató jelváltozásokat.

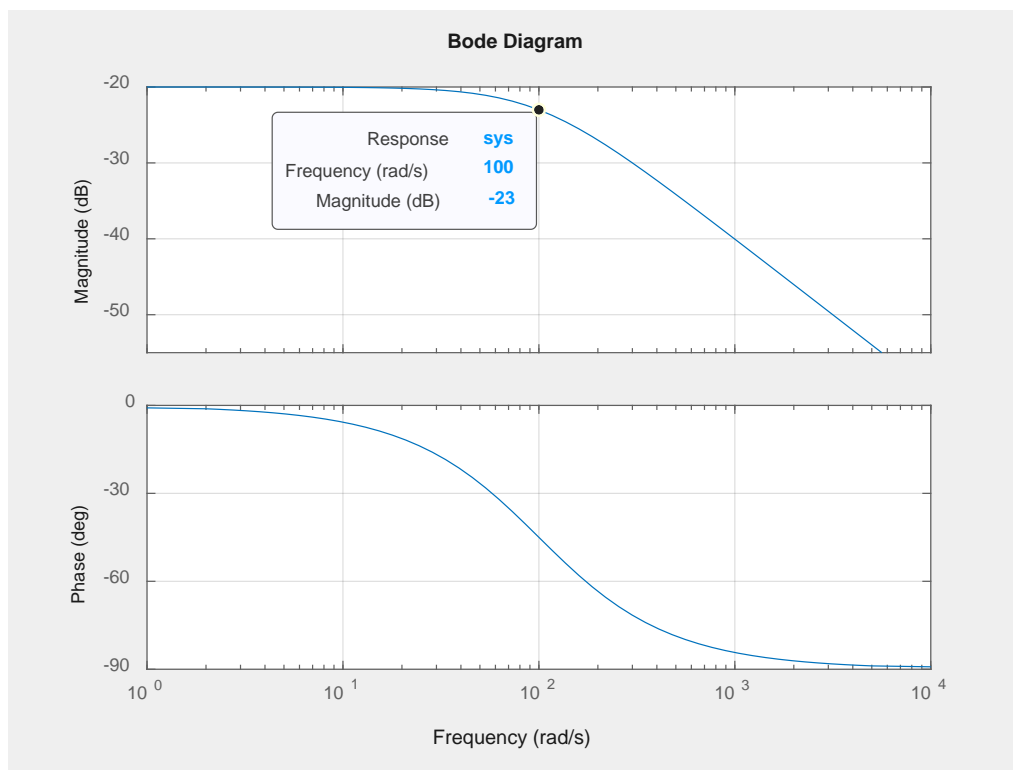
Végezetül, 'piros' színnel jelöltem a  $T + p$  időpillanatot, amikor  $r(t) = x(t)$ , vagyis a kimeneti jel eléri a referencia jel értékét. Az MPC irányítás elvi sémáját megadó ábrán (7.45. ábra) a jövőbeli kimenet jelölésére az  $x(t)$  jelölést választottam, bár használhattam volna akár  $x_{ki}(t)$ , vagy  $y(t)$  jelölést is.

Mivel a (7.205) egyenlet időtartományban felírt állapotteres modell, ezért a benne helytelenül szerepeltetett  $Y_d$  nem jelölhet átviteli függvényt: így a (7.205) és a (7.206) egyenletek nem kapcsolhatók össze.

A (7.206) egyenlet a (7.207) egyenlettel és a 7.46. ábrával kapcsolható össze. A (7.207) egyenlet helyesen:

$$p_n(s) = \frac{A}{1+sT} \delta_a(s) + Y_d(s)D(s) = \frac{1,1965}{0,0502s+1} \delta_a(s) + \frac{0,1}{0,01s+1} D(s). \quad (7.207)$$

A (7.206) és a (7.207) egyenletekben az  $Y_d(s) = \frac{A}{sT+1} = \frac{0,1}{0,01s+1}$  átviteli függvény egy aluláteresztő szűrő, amelynek szerepe a nagyfrekvenciás jelek szűrése, és a 'jel-zaj' viszony javítása (51. ábra).

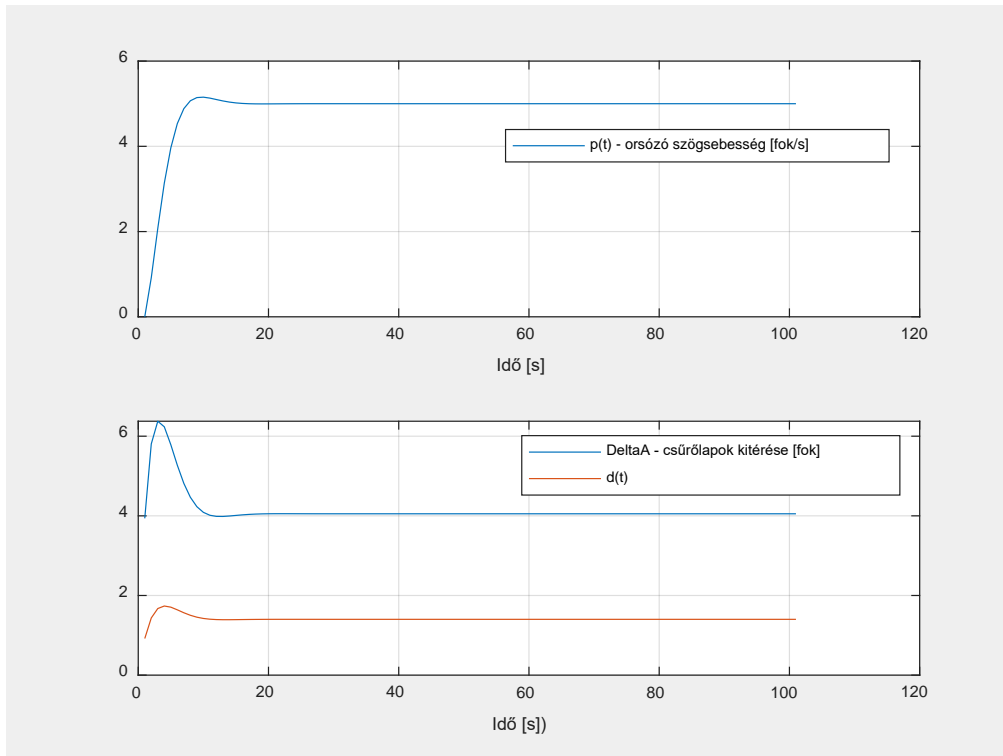


51. ábra. Alul áteresztő szűrő Bode-diagramja.

Az 51. ábrán jól látható, hogy a szűrő már a 100 rad/s törésponti frekvenciától kisebb, de főleg a tőle nagyobb körfrekvenciákon is lényeges mértékben szűri a nagyfrekvenciás zavarjeleket. A szűrő az  $A$  erősítés, és a  $T$  időállandó megfelelő megválasztásával szükségére szerint tovább hangolható.

Az MPC-szabályozó újra tervezésekor  $\Delta t = 0,01$  s mintavételezési időt alkalmazva, és az eredmények megjelenítésekor a 'stairs' nyomtatási opció helyett a 'plot.m' függvényt alkalmazva az 52. ábrán látható eredményre jutunk.





52. ábra. A Trainer-60 SUAV oldalirányú, rövidperiodikus mozgásának jellemzői.

Az MPC módszer alkalmazása egy lehetséges út a zárt szabályozási rendszer tervezésekor, az alkalmazása nem feltétlen szükséges egy-egy robotpilótában.

A bemutatott példa arra szolgált, hogy bemutassa a módszer elméleti háttérét, és keretet adjon a módszert a jövőben alkalmazni kívánók számára. Az értekezésben a MATLAB® 'cmplc.m' függvényt alkalmaztam az MPC-szabályozás előzetes tervezésére, annak minden velejáró előnyével és korlátjával.

### Kérdés

- Az UAV operátor modellek mindegyike a szakirodalomból van, vagy van ami kifejezetten saját fejlesztés? (8.47)-ben az  $n=5$  rendű Padé approximáció legjobbnak ítéletét követően a szerző visszatér elsőrendű közelítésre. Mi ennek az oka? A 8.10, 8.11 és 8.12 ábrákon kérem a közelített holtidős rendszer videlkedésének feltüntetését is, hogy jobban látszódjon a közelítések minősége! A 8.14 és 8.16 ábrák alapján biztosan a PD-TD operátor modell a legjobb? 8.14 alatt még P-TD van legjobbként kiemelve, de 8.16 alatt már a PD-TD szerepel és ezt viszi tovább a következő alfejezetben. Sőt, a TVI/3 tézispontot is ez alapján mondja ki. Ugyanakkor ennek a tagnak a 8.16 ábra szerint elfogadhatatlanul nagy a túllövése. Miért ezt választotta mégis?

**Válasz:** Az UAV operátorok/kezelők matematikai modelljének meghatározása során a PiL (Pilot-in-the-Loop) rendszerekben tevékenykedő operátorokkal kapcsolatos szakmai-tudományos kutatói tevékenység egyik alapvető kitétele, hogy az operátor hozzájáruljon, hogy a tevékenységével kapcsolatos adatokat felvegyék, azokat kiértékeljék, majd a regisztrált adatokat archiválják, és a szükséges és indokolt ideig tárolják. A légi jármű-vezetők, UAV operátorok tevékenysége, a felvett adatok alapján az operátor fizika-mentális állapotának megítélése, az operátor fitssége különleges személyes adat, melyet a törvény szigorúan véd.

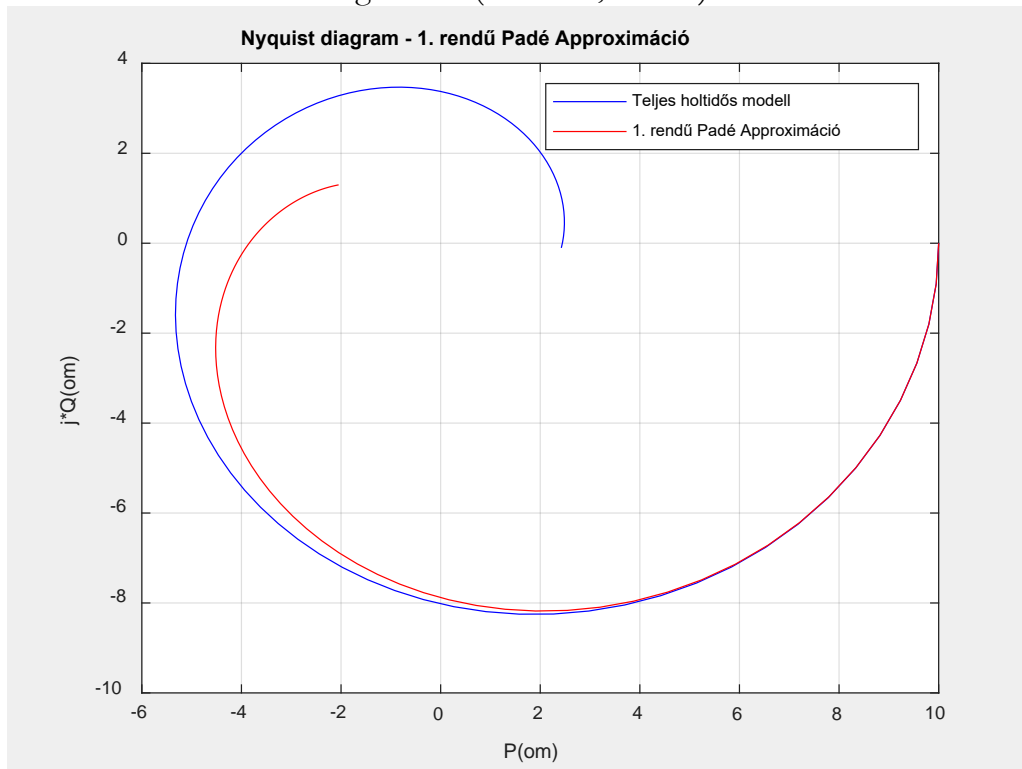
Megállapíthatjuk tehát, hogy az UAV operátorok, a légi jármű vezetők tevékenységével kapcsolatos kísérleti mérések nem kizárólag műszaki-tudományos kihívások, hanem a jog oldaláról nézve is számos adatvédelmi feladatot kell megoldani, ami kevésbé tekinthető kreatív, új tudományos eredménnyel kecsegtető tevékenységnek.

Ily módon, nem véletlenül, a repülés és az űrhajózás területén az emberek, az operátorok, pilóták tevékenységével kapcsolatos kísérletek és tudományos kutatások, rendszerint valamilyen repülő-űrorvosi kutatással foglalkozó egyetemi tanszéken<sup>35,36</sup>, valamint a Magyar Honvédség, Egészségügyi Központ, Repülőorvosi-, Alkalmasságvizsgáló és Gyógyító Intézetben<sup>37</sup> valósulnak meg, ahol nemcsak a szakmai-tudományos kutatások, hanem az adatkezeléssel kapcsolatos tevékenységek is megnyugtatóan történnek. Az általam felhasznált operátor-modelleket szakirodalmi hivatkozással használtam, amelyeket jórészt a NATO AGARD kiadványok tartalmaznak, amelyek az 1950-es évektől kezdődő, és a hangsebesség feletti repülés, valamint az űrrepülés emberi szervezetre gyakorolt hatását, és a hajózók és űrhajósok alkalmasságát vizsgáló kutatások eredményeit foglalták össze. A repülőorvosi kísérleteket főként fiatalok vadászpilóták, teszt-, vagy berepülő pilóták részvételével hajtották végre, így az idézett irodalmakban közölt matematikai modellek és azok paraméterei csak erős megkötésekkel alkalmazhatók az UAV operátorok viselkedésének leírására. Mindazonáltal, eme irodalmak jó alapot szolgáltatnak a PiL-szabályozások vizsgálatának UAVkra történő kiterjesztésére.

A holtidő Padé-approximációs közelítésére a

$$\delta \leq \pm 0,02 \tag{8.16}$$

feltételt alkalmaztam. Megemlítjük, hogy ez a 2%-os hibával történő közelítés már az  $n = 5$  approximációs rendszám esetén megvalósul (8.3. ábra, részlet).

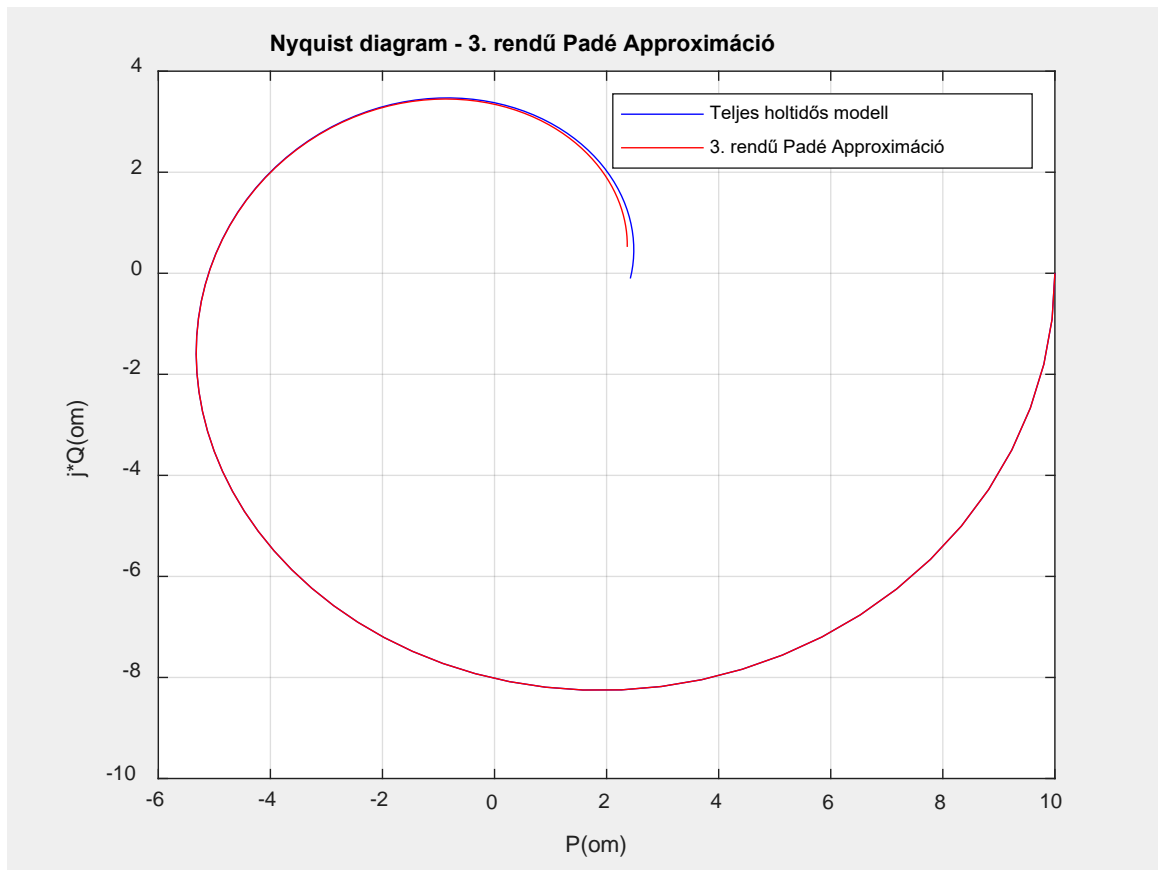


8.3. ábra. A  $G(j\omega)$  és a  $\hat{G}(j\omega)$  frekvenciafüggvényei (MATLAB-script: szerző).

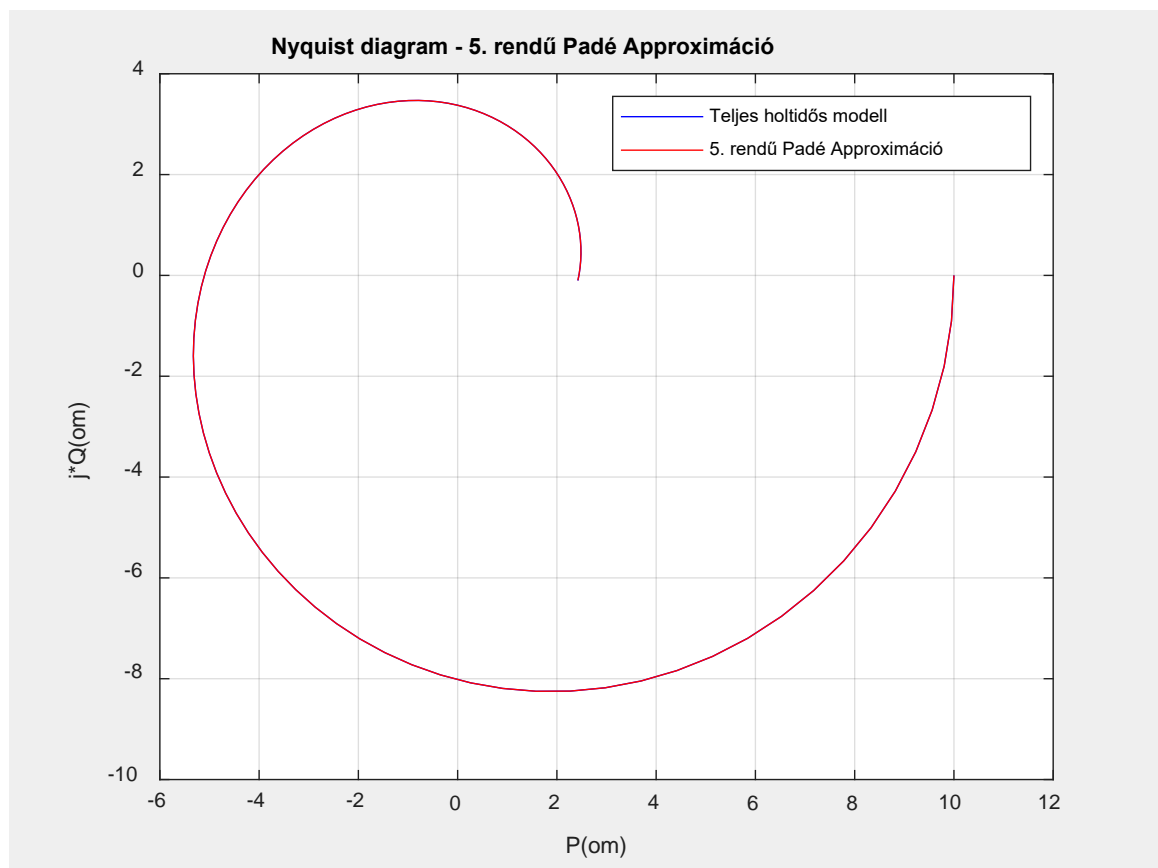
<sup>35</sup> <https://u-szeged.hu/szakk/repulo/tanszek>. Letöltés: 2024. 11. 22.

<sup>36</sup> <https://semmelweis.hu/tdk/rektori-palyazat/rektori-palyazat-meghirdetett-temak/rektori-palyazat-varosmajori-sziv-es-ergyogyaszati-klinika-repulo-es-urorvostani-tanszek/>. Letöltve: 2024. 11. 22.

<sup>37</sup> <https://www.mhek.hu/ravgyi-index.html>. Letöltve: 2024. 11. 22.



8.3. ábra. A  $G(j\omega)$  és a  $\hat{G}(j\omega)$  frekvenciafüggvényei (MATLAB-script: szerző).



8.3. ábra. A  $G(j\omega)$  és a  $\hat{G}(j\omega)$  frekvenciafüggvényei (Folyt.)

A 8.3. ábrán is jól látható, hogy a teljes holtidős modell Nyquist-diagramja gyakorlatilag együtt fut az 5. rendű Padé-approximációs modellel.

Mindazonáltal, hasonlóképpen számos járműdinamikai (pl. gépjárművezetők, operátorok, kezelők stb.) alkalmazáshoz, a számítások egyszerűsítése végett a további vizsgálataim során az elsőrendű közelítést alkalmaztam.

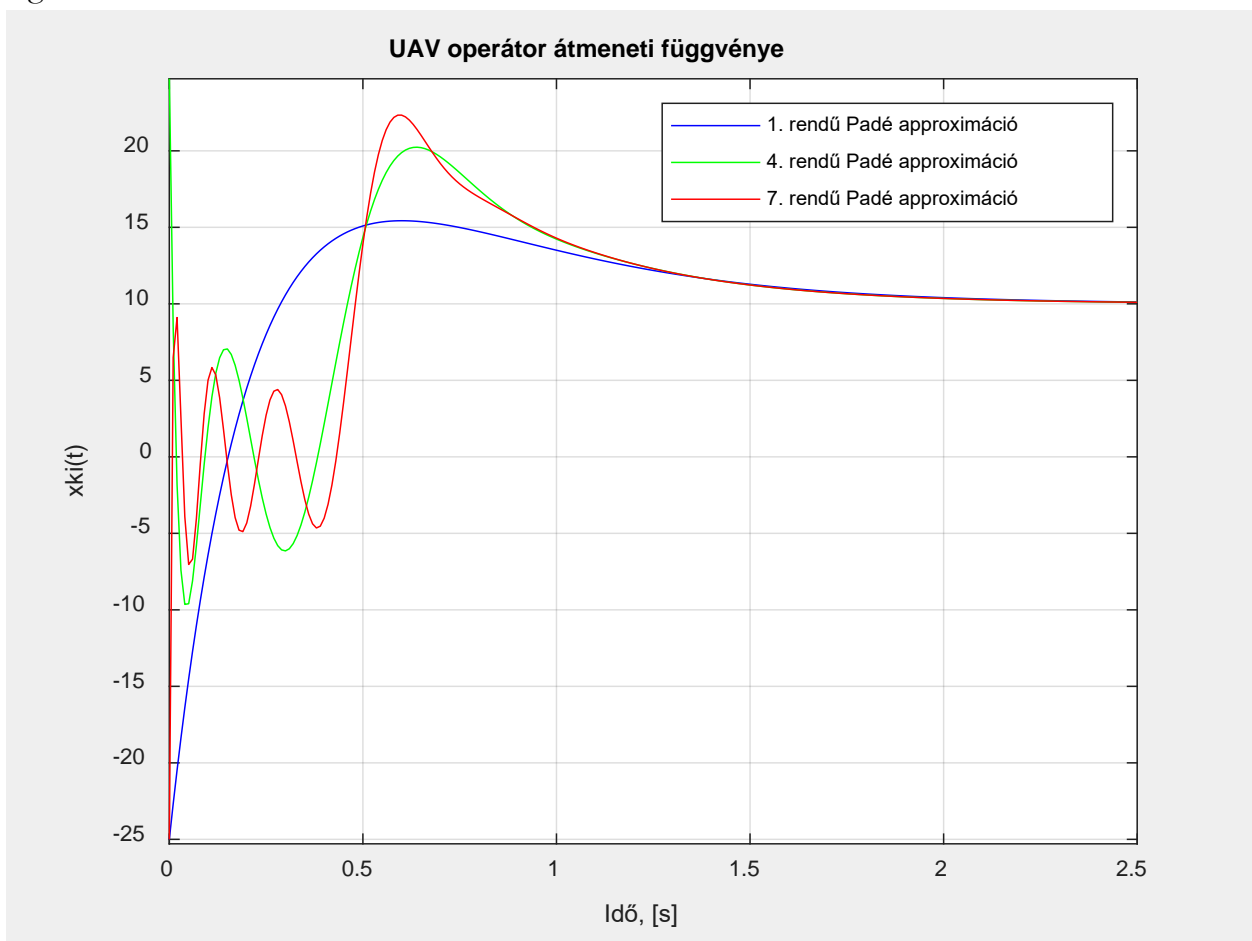
A 8.10., a 8.11., és a 8.12. ábrákon az operátorok alapjel-követő viselkedését a

$$Y_p(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K_p \frac{(1+sT_p)}{(1+sT_1)} e^{-s\tau}, \quad (8.32)$$

átviteli függvényt felhasználva, a

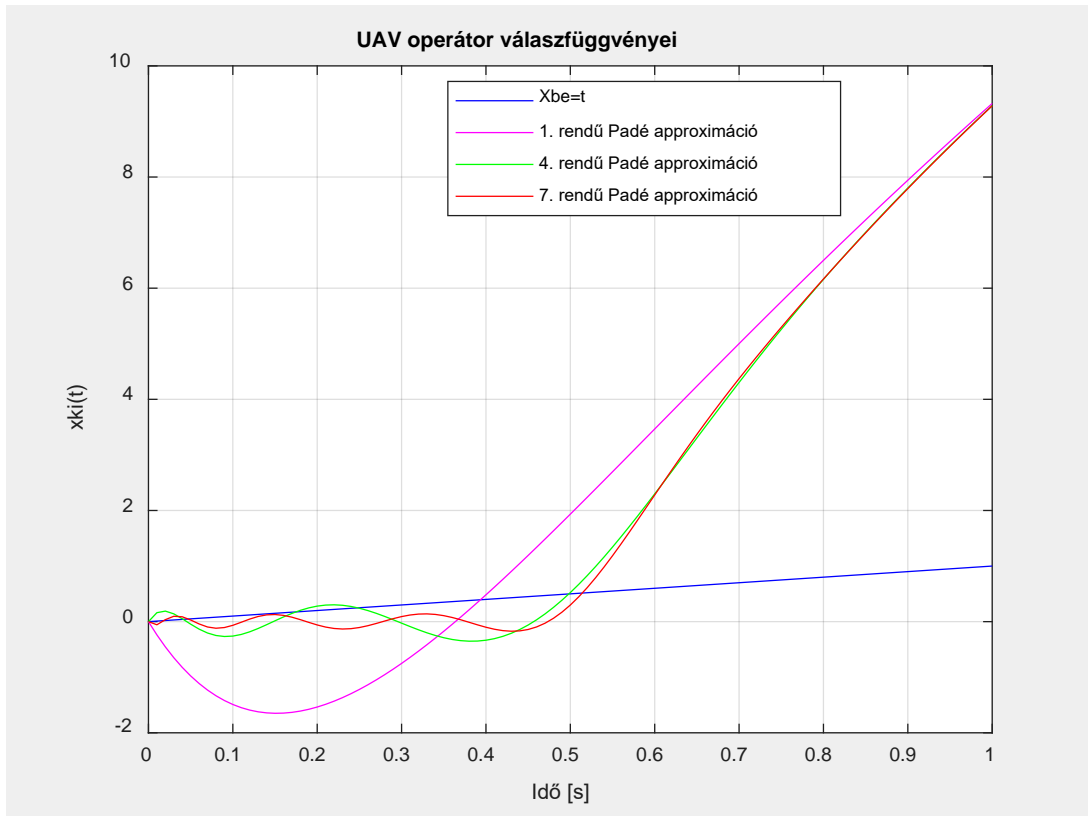
$$K_p = 10; T_p = 1s; T_1 = 0,4s; \tau = 0,5s. \quad (8.50)$$

paramétereket felhasználva mutattam be. A 8.10. ábra az operátor átmeneti függvénye, vagyis annak reprezentálása, hogy az operátor a számára közölt egységugrás bemeneti jelre hogyan reagál.



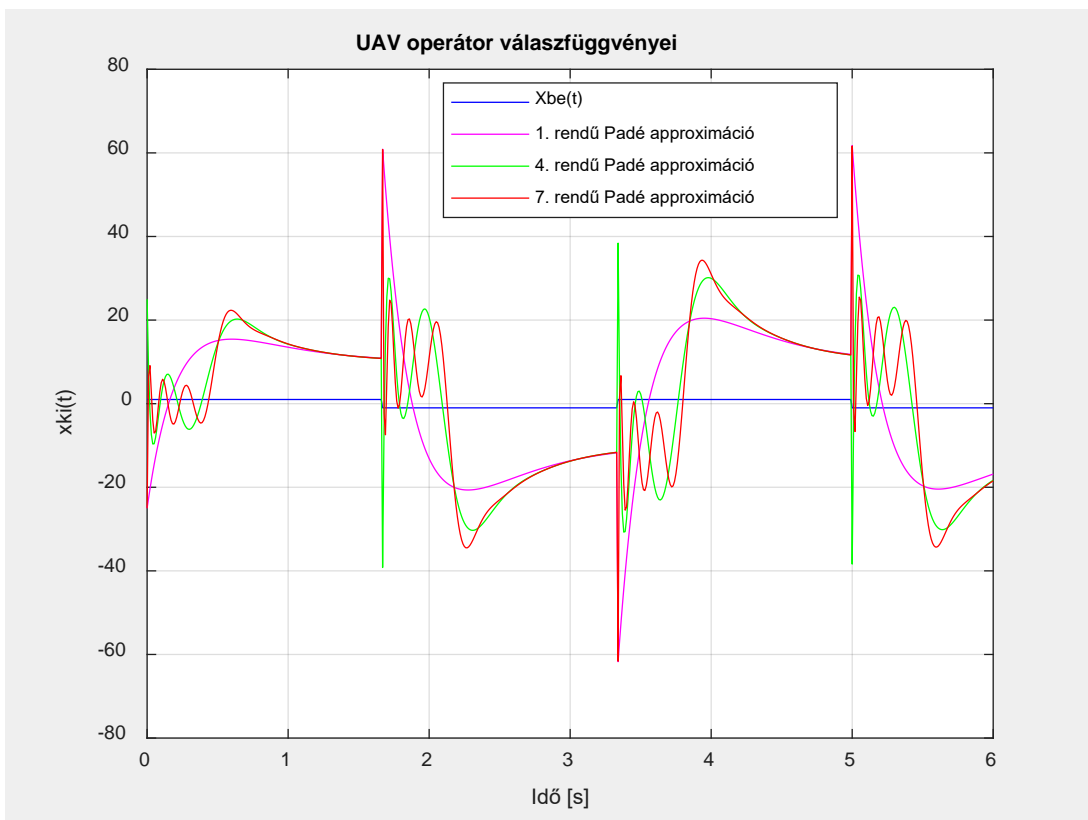
8.10. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).

A 8.11. ábra azt mutatja be, hogy az operátor hogyan képes követni a számára közölt lineáris bemeneti jelet.



8.11. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).

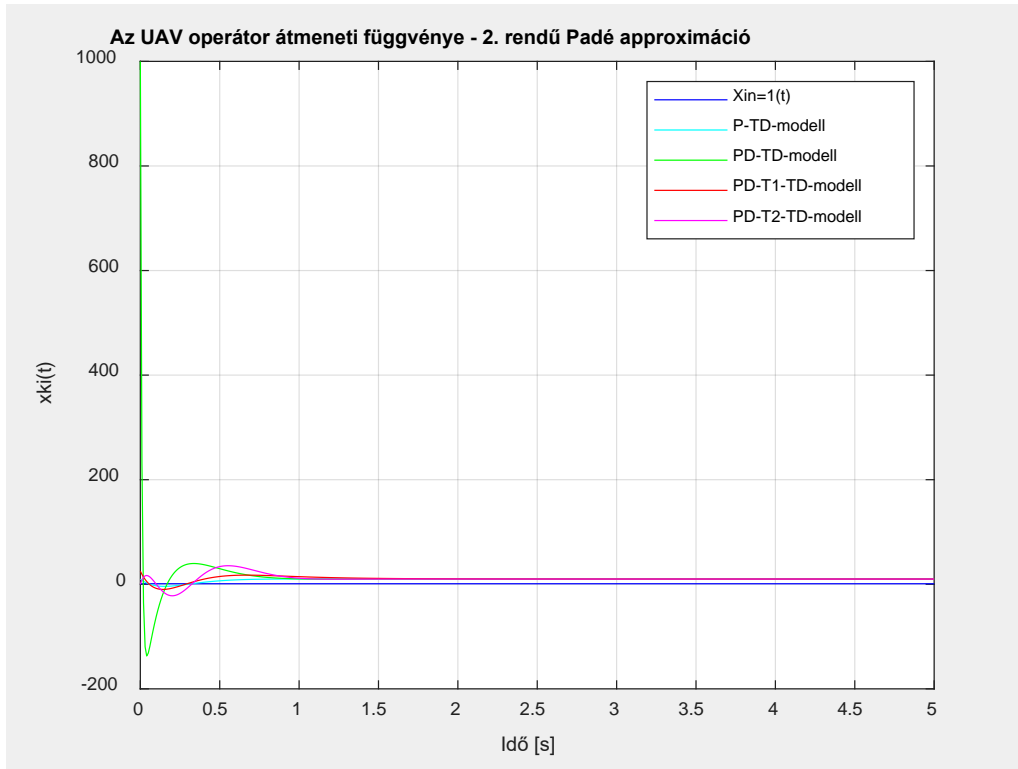
A 8.12. ábra azt mutatja be, hogy az operátor hogyan képes reagálni az előjelváltó bemeneti négyzetjelre.



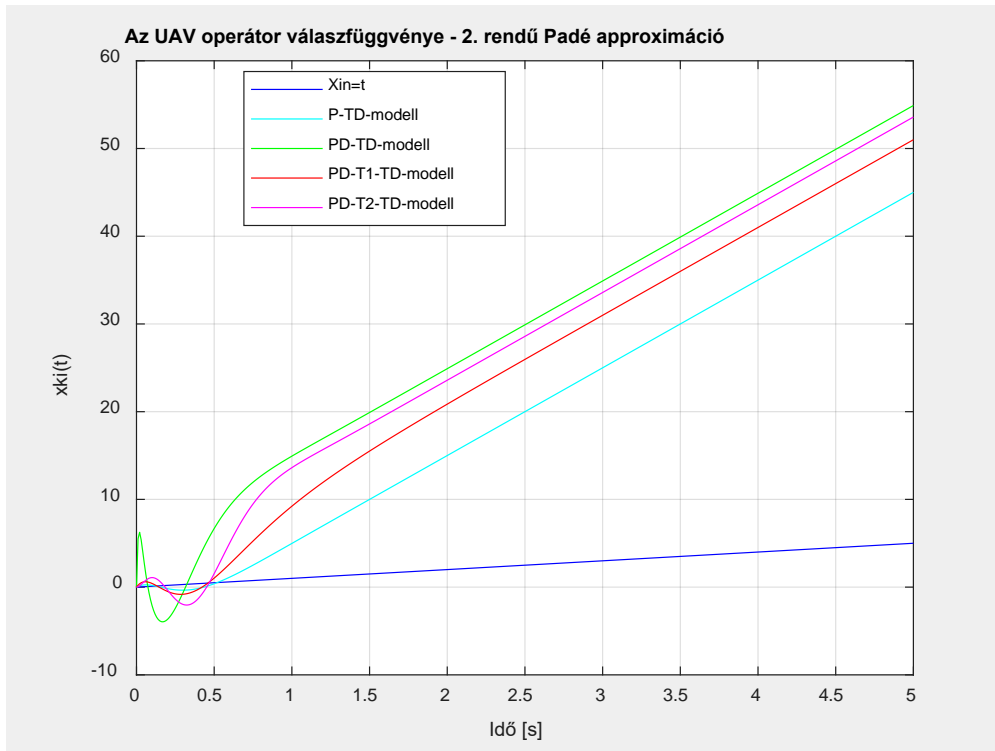
8.12. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).

A 8.14., a 8.15., és a 8.16. ábrákon különféle operátor-modellek viselkedését hasonlítottam össze:

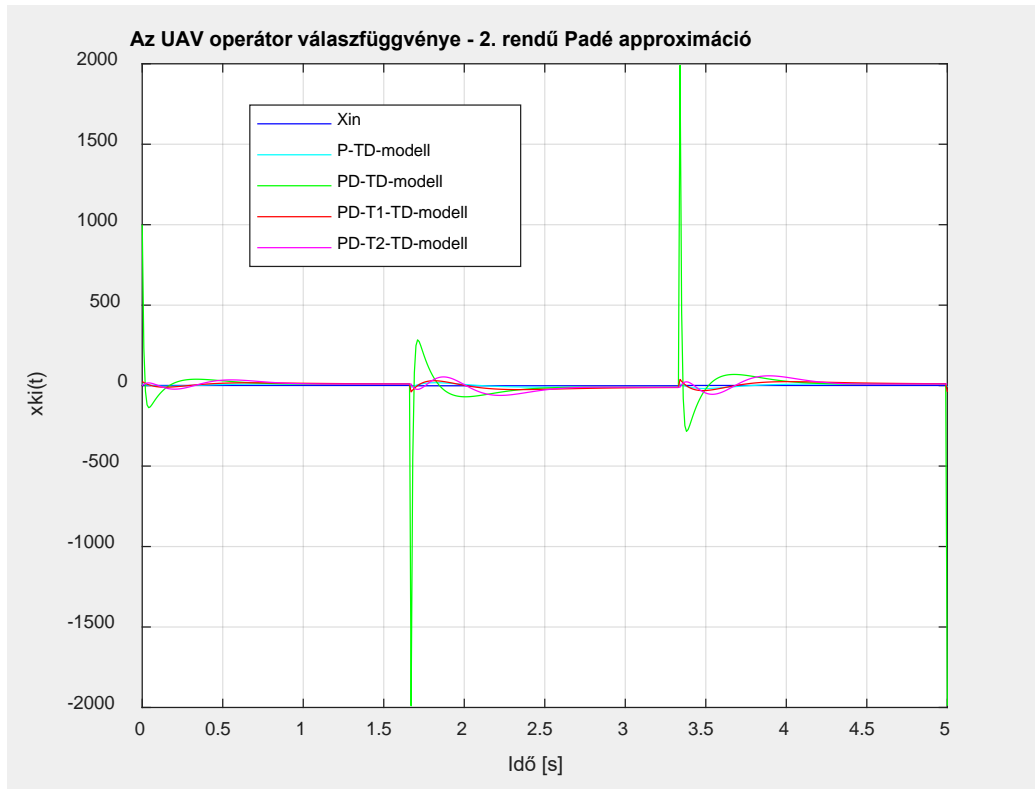
- P-TD: arányos, holtidős (P-TD): (8.30) egyenlet;
- PD-TD: arányos, differenciálós, holtidős: (8.31) egyenlet;
- PD-1O-TD: arányos, egytárolós, differenciálós, holtidős: (8.32) egyenlet;
- PD-2O-TD: arányos, kéttárolós (lengő), differenciálós, holtidős (8.41) egyenlet.



8.14. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).



8.15. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).



8.16. ábra. Az operátor viselkedése időtartományban (MATLAB-script: szerző).

A 8.14., a 8.15., és a 8.16. ábrákon az egyes modellek válaszfüggvényeit az alábbi módon jelöltem:

- P-TD-modell;
- PD-TD-modell;
- PD-T1-TD-modell;
- PD-T2-TD-modell.

Az ábrákon a magyar nyelvű 'T' (tároló) jelölést használtam (T1: egytárolós, elsőrendű; T2: kéttárolós, másodrendű), míg az ezen eredményeket megelőző szövegrészben – bár magyarul is kifejtettem a jelentésüket – de az angol '1st order', '1O', és a '2nd order', '2O' jelöléseket alkalmaztam, ami nem volt szerencsés.

A négy operátor modell 'jóságának', vagy akár a 'megfelelőségének' a megítélését számos tényező befolyásolja. Általában elmondhatjuk, hogy az operátoroktól elvárjuk a prediktív (differenciáló) viselkedést, az előre látó képességet és tevékenységet: az UAVk irányítása során a repülési pályán jellemzően mindig egy előre tartási pontra irányítják az UAVkat.

Az UAV operátorok sokszor meglehetősen bonyolult, többcsatornás irányítást (pl. leszállóhely megközelítése: repülési sebesség, irányszög, repülési magasság, bólintási szög, dőlési szög; kismagasságú repülés 3Ds repülési pályán; ismeretlen, ellenséges környezetben végrehajtott repülés) hajtanak végre, amikor gyors beavatkozást várunk el tőlük: az operátorok tevékenységét ilyenkor leginkább pontosan a 'P-TD' modell jellemzi és írja le.

Más esetekben, egyszerű, egycsatornás irányítást (pl. repülési magasság stabilizálás, vagy irányszög stabilizálás) hajtanak végre, ami kevésbé terheli meg az operátorokat, és akár 'PD-T2-TD' modellt is alkalmazhatunk az operátorok tevékenységének vizsgálatára.

Minél bonyolultan egy-egy repülési feladat, annál egyszerűbb matematikai modellt alkalmazunk az operátorok tevékenységének leírására.

A 'PD-TD' modell szerint viselkedő UAV operátor a 8.14. ábrán az  $x_{in}(t) = 1(t)$  egységugrás, míg a 8.16. ábrán a négyszögjel bemeneti jelekre adott válaszjeleit láthatjuk. Mindkét jel viselkedésére jellemző, hogy az  $x_{in}(0) = 0$  időpillanatban értékük pillanatszerűen eléri az új értéket.

Az egységugrás jel függvénye a  $(-\infty < t < 0)$  időtartományban egybeesik a vízszintes tengellyel, majd az  $x_{in}(0) = 0$  időpillanatban az eredeti irányhoz 90 fokkal megváltoztatja irányát, és a függőleges tengelyt kezdi el követni.

Ha a  $t = 0$  időpillanatban az origóból érintőt húzunk az  $1(t)$  függvényhez, a 90 fokos szögváltozás tangense lesz a derivált, aminek értéke  $(tg(+90) \rightarrow +\infty)$  miatt nagy lesz az  $x_{in}(0) = 0$  időpillanatban.

A vizsgálatok során a MATLAB® program által generált egységugrás, és négyszögjel függvényekkel dolgoztam. A való életben ilyen jelleggel viselkedő jeleket az alapjel képző szervek, vagy a parancsjel képző rendszerek nem hoznak létre, inkább jellemző, hogy lassan változó jeleket kell követniük az UAV operátoroknak.

A 8.15. ábrán jól látható, hogy a  $x_{in}(t) = t$  bemeneti jelre adott válaszfüggvények közül a valóban a 'PD-TD' modellel jellemezhető UAV operátor viselkedése a leginkább megfelelő, ezért bátorkodtam a zárt PiL-rendszerek vizsgálata során az UAV operátorok 'PD-TD' modelljét alkalmazni, és az e területen elért eredményeimet a 'TVI' megfogalmazni

## Kérdés

- Az operátor modell UAV szabályzásban való alkalmazásához kérem, hogy hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 UAV hosszdinamikáját használja! Illetve kérem, hogy nézze meg keresztidynamikára is a kiadódó eredményeket, hogy milyen különbségek adódnak a kritikus holtidők, erősítések és predikciós időállandók között?

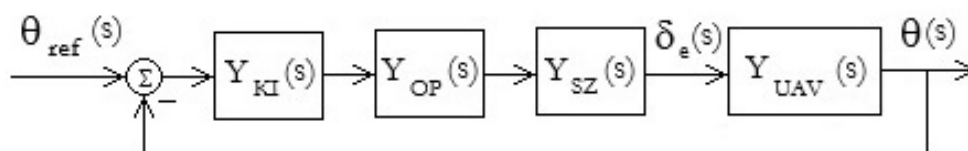
## Válasz:

### I. Az UAV operátor kritikus paramétereit: $\tau$ kritikus értékének számítása

A 'Trainer-60' SUAV hosszirányú, rövidperiodikus mozgásának SISO modellje P. Eng<sup>38</sup> műve alapján a következő alakban írható fel:

$$Y_{UAV}(s) = \frac{\vartheta(s)}{-\delta_e(s)} = \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}$$

ahol  $\vartheta$  a bólintó szög, és  $\delta_e$  a magassági kormány szöghelyzet változása. Az UAV hosszirányú irányítási csatornájában tevékenykedő UAV operátor jellemzőinek irányítástechnikai vizsgálatát az 53. ábra segítségével végezzük el:



53. ábra. UAV operátor tevékenysége az UAV hosszirányú irányítási csatornájában (saját szerkesztés).

Az 53. ábrán látható hatásvázlatban az alábbi átviteli függvényeket alkalmaztam:

$$Y_{KI}(s) = 1$$

<sup>38</sup> Eng, P. C. S. *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing*. PhD Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2011.



$$Y_{OP}(s) = K_p(1 + sT_p)e^{-s\tau} \cong 10(1 + s) \frac{1 - \tau/2s}{1 + \tau/2s}$$

$$Y_{SZ}(s) = \frac{40}{40+s} = \frac{1}{1+0,025s} \cong 1$$

Az 53. ábrán az UAV PiL zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvénye most a következő lesz: első lépésben keressük a belső hurok eredő átviteli függvényét, ami most a következő alakban írható fel:

$$W(s) = \frac{\vartheta(s)}{\vartheta_{ref}(s)} = \frac{Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)}{1+Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)}{1+Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{K_p(1+sT_p)e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}}{1+K_p(1+sT_p)e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}} =$$

$$\frac{10(1+s) \frac{1 - \tau/2s}{1 + \tau/2s} \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}}{1+10(1+s) \frac{1 - \tau/2s}{1 + \tau/2s} \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}} = \frac{10 \cdot (s+1)(1 - \tau/2s)(18,79s+13,57)}{(1 + \tau/2s)s(s^2+14s+88,56) + 10 \cdot (s+1)(1 - \tau/2s)(18,79s+13,57)}$$

A fenti átviteli függvény karakterisztikus egyenlete pedig a következő lesz:

$$K(s) = s \cdot (1 + \tau/2s)(s^2 + 14s + 88,56) + 10 \cdot (s + 1)(1 - \tau/2s)(18,79s + 13,57) = 0,$$

vagy elvégezve a kijelölt műveleteket:

$$K(s) = \tau/2 s^4 + s^3(7\tau - 92,95) + s^2(201,9 - 117,52\tau) + s(412,16 - 67,85\tau) + 135,7 = a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4 = 0.$$

A fenti egyenlet alapján határozzuk meg az 53. ábrán látható zárt szabályozási rendszer stabilitásának szükséges feltételeit, amely a karakterisztikus egyenlet együtthatóira felírt előjelszabály, vagyis:

$$a_0 = (\tau/2) > 0; \rightarrow \tau > 0 \text{ s},$$

$$a_1 = (7\tau - 92,95) > 0; \rightarrow \tau > 13,2785 \text{ s},$$

$$a_2 = (201,9 - 117,52\tau) > 0; \rightarrow \tau < 1,718 \text{ s}.$$

$$a_3 = (412,16 - 67,85\tau) > 0; \rightarrow \tau < 6,0745 \text{ s}.$$

$$a_4 = 135,7 > 0.$$

A fenti egyenletek alapján elmondható, hogy a stabilitás szükséges feltétele:

$$0 \text{ s} < \tau < 1,718 \text{ s}.$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a stabilitás elégséges feltételeit is. A karakterisztikus egyenlet együtthatóit felhasználva a zárt szabályozási rendszer Hurwitz–determinánsa most a következő lesz:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) & 0 & 0 \\ \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) & 135,7 & 0 \\ 0 & (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) & 0 \\ 0 & \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) & 135,7 \end{vmatrix}$$

A stabilitás elégséges feltétele, hogy a Hurwitz-determináns összes főátlóra támaszkodó aldeterminánsa pozitív legyen, vagyis:

$$\Delta_i > 0.$$

Ha akár egy aldetermináns is negatív, akkor a zárt szabályozás instabil működésű. Ha valamelyik aldetermináns zérus értékű, akkor e feltételből meghatározhatjuk a rendszer egy paraméterének kritikus értékét, amely esetén a zárt szabályozási rendszer a stabilis működés határára kerül.

Az aldeterminánsok, és a kritikus (maximális) értékű holtidók az alábbiak lesznek:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) \\ \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) \end{vmatrix} = (7\tau - 92,95) \cdot (201,9 - 117,52\tau) - \frac{\tau}{2} \cdot (201,9 - 117,52\tau)$$

$$= -788,715\tau^2 + 12130,704\tau - 18766,605 > 0$$

A kritikus holtidőt az alábbi egyenlet megoldása adja:

$$-788,715 \cdot \tau_{krit}^2 + 12130,704 \cdot \tau_{krit} - 18766,605 = 0,$$

amelyek – a MATLAB® 'roots.m' függvényét felhasználva – az alábbiak:

$$\tau_{krit_1} = 1,7450 \text{ s}, \tau_{krit_2} = 13,6353 \text{ s}.$$

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) & 0 \\ \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) & 135,7 \\ 0 & (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) \end{vmatrix} \\ &= -135,7 \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) \\ 0 & (7\tau - 92,95) \end{vmatrix} \\ &+ (412,16 - 67,85\tau) \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) \\ \tau & (201,9 - 117,52\tau) \end{vmatrix} \\ &= 53514,3127\tau^3 - 1138147,4834\tau^2 + 6273119,9476\tau - 7734843,9168 > 0 \end{aligned}$$

A kritikus holtidőt most az alábbi egyenlet gyökei adják:

$$53514,3127\tau^3 - 1138147,4834\tau^2 + 6273119,9476\tau - 7734843,9168 = 0,$$

amelyek – a MATLAB® 'roots.m' függvényét felhasználva – az alábbiak:

$$\tau_{krit_1} = 1,7341 \text{ s}, \tau_{krit_2} = 6,2964 \text{ s}, \tau_{krit_3} = 13,2376 \text{ s}.$$

Tekintettel arra, hogy a rendszer Hurwitz-determinánsa felírható, mint

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) & 0 & 0 \\ \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) & 135,7 & 0 \\ 0 & (7\tau - 92,95) & (412,16 - 67,85\tau) & 0 \\ 0 & \tau/2 & (201,9 - 117,52\tau) & 135,7 \end{vmatrix} = 135,7\Delta_3,$$

így a teljes  $\Delta_4$  rendszerdetermináns a holtidőre nem határoz meg új kritikus értéket.

Összefoglalva a  $\tau$  holtidőre meghatározott értékeket,  $K_p = 10$ ,  $T_p = 1$ s értékek mellett a holtidő lehetséges értékei tehát az alábbi tartományon vehetnek fel értékeket:

$$0 \text{ s} < \tau < 1,718 \text{ s}.$$

## II. Az UAV operátor kritikus paramétereit: 'K<sub>p</sub>' kritikus értékének számítása T<sub>p</sub> = 1s és τ = 0,5s esetén

Az operátor átviteli függvénye most az alábbi alakban írható fel:

$$Y_{OP}(s) = K_p(1 + s)e^{-s\tau} \cong K_p(1 + s) \frac{1 - \tau/2s}{1 + \tau/2s} = K_p(1 + s) \frac{1 - 0,25s}{1 + 0,25s}$$

Az 53. ábrán az UAV PiL zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvénye a következő lesz:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{\vartheta(s)}{\vartheta_{ref}(s)} = \frac{Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)}{1 + Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)}{1 + Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{K_p(1 + sT_p) e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s + 13,57}{s(s^2 + 14s + 88,56)}}{1 + K_p(1 + sT_p) e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s + 13,57}{s(s^2 + 14s + 88,56)}} = \\ &= \frac{K_p(1 + s) \frac{1 - 0,25s}{1 + 0,25s} \frac{18,79s + 13,57}{s(s^2 + 14s + 88,56)}}{1 + K_p(1 + s) \frac{1 - 0,25s}{1 + 0,25s} \frac{18,79s + 13,57}{s(s^2 + 14s + 88,56)}} = \frac{10 \cdot (s + 1)(1 - 0,25s)(18,79s + 13,57)}{(1 + 0,25s)s(s^2 + 14s + 88,56) + K_p \cdot (s + 1)(1 - 0,25s)(18,79s + 13,57)}. \end{aligned}$$

A fenti átviteli függvény karakterisztikus egyenlete pedig a következő lesz:

$$K(s) = (1 + 0,25s)s(s^2 + 14s + 88,56) + K_p \cdot (s + 1)(1 - 0,25s)(18,79s + 13,57) = 0,$$

vagy, elvégezve a fenti kijelölt műveleteket:

$$K(s) = 0,25s^4 + s^3(4,5 - 4,6975K_p) + s^2(36,14 + 10,7K_p) + s(88,56 + 28,9675K_p) + 13,57K_p = 0.$$

A fenti karakterisztikus egyenlet alapján határozzuk meg az 53. ábrán látható zárt szabályozási rendszer stabilitásának szükséges feltételeit, amely a karakterisztikus egyenlet együtthatóira felírt előjelszabály, vagyis:

$$a_0 = 0,25 > 0;$$

$$a_1 = (4,5 - 4,6975K_p) > 0; \rightarrow K_p < 0,9579,$$

$$a_2 = (36,14 + 10,7K_p) > 0; \rightarrow K_p < -3,6579,$$

$$a_3 = (88,56 + 28,9675K_p) > 0; \rightarrow K_p < -3,0572.$$

$$a_4 = 13,57K_p > 0, \rightarrow K_p > 0$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a stabilitás elégséges feltételeit is. A karakterisztikus egyenlet együtthatóit felhasználva a zárt szabályozási rendszer Hurwitz–determinánsa most a következő lesz:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) & 0 & 0 \\ 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p & 0 \\ 0 & (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) & 0 \\ 0 & 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p \end{vmatrix}$$

A főátlóra támaszkodó aldeternimánsok, és a kritikus (maximális) értékű holtidők az alábbiak lesznek:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) \\ 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) \end{vmatrix} = (4,5 - 4,6975K_p)(36,14 + 10,7K_p) - 0,25(88,56 + 28,9675K_p) > 0$$

A kritikus  $K_p$  értéket az alábbi egyenlet megoldásai adják:

$$-50,2632 \cdot K_{pkrit}^2 - 128,8594 \cdot K_{pkrit} + 140,49 = 0,$$

amelyek – a MATLAB® 'roots.m' függvényét felhasználva – az alábbiak:

$$K_{pkrit_1} = -3,3886, K_{pkrit_2} = 0,8249.$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) & 0 \\ 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p \\ 0 & (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) \end{vmatrix} = (4,5 - 4,6975K_p) \begin{vmatrix} (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p \\ (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) \end{vmatrix} - 0,25 \begin{vmatrix} (88,56 + 28,9675K_p) & 0 \\ (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) \end{vmatrix} = -1755,4425K_p^3 - 7486,5578K_p^2 - 7735,5321K_p + 10481,076 > 0$$

A  $K_p$  erősítés kritikus értékét most az alábbi egyenlet gyökei adják:

$$= -1755,4425K_p^3 - 7486,5578K_p^2 - 7735,5321K_p + 10481,076 = 0,$$

amelyek – a MATLAB® 'roots.m' függvényét felhasználva – az alábbiak lesznek:

$$K_{pkrit_1} = 0,7375, K_{pkrit_{23}} = -2,5011 \pm 1,3565i.$$

Tekintettel arra, hogy a rendszer Hurwitz-determinánsa felírható, mint

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) & 0 & 0 \\ 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p & 0 \\ 0 & (4,5 - 4,6975K_p) & (88,56 + 28,9675K_p) & 0 \\ 0 & 0,25 & (36,14 + 10,7K_p) & 13,57K_p \end{vmatrix} = 13,57K_p \Delta_3,$$

így a teljes  $\Delta_4$  rendszerdetermináns triviális megoldása  $K_p = 0$ .

Összefoglalva a  $K_p$  erősítésre korábban már meghatározott értékeket –  $T_p = 1s, \tau = 0,5s$  értékek mellett – az erősítés lehetséges értékei tehát az alábbi tartományon vehetnek fel értékeket:

$$0 < K_p < 0,7375.$$

### III. Az UAV operátor kritikus paraméterei: ' $T_p$ ' kritikus értékének számítása $K_p = 10$ és $\tau = 0,5s$ esetén

Az operátor átviteli függvénye most az alábbi alakban írható fel:

$$Y_{OP}(s) = K_p(1 + sT_p)e^{-s\tau} \cong 10(1 + sT_p)\frac{1-\tau/2s}{1+\tau/2s} = 10(1 + sT_p)\frac{1-0,25s}{1+0,25s}$$

Az 53. ábrán az UAV PiL zárt szabályozási rendszer alapjelre vonatkoztatott eredő átviteli függvénye a következő lesz:

$$W(s) = \frac{\vartheta(s)}{\vartheta_{ref}(s)} = \frac{Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)}{1+Y_{KI}(s)Y_{OP}(s)Y_{SZ}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)}{1+Y_{OP}(s)Y_{UAV}(s)} = \frac{10(1+sT_p)e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}}{1+10(1+sT_p)e^{-s\tau} \cdot \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}} = \frac{10(1+sT_p)\frac{1-0,25s}{1+0,25s} \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}}{1+10(1+sT_p)\frac{1-0,25s}{1+0,25s} \frac{18,79s+13,57}{s(s^2+14s+88,56)}} = \frac{10(1+sT_p)(1-0,25s)(18,79s+13,57)}{(1+0,25s)s(s^2+14s+88,56)+10(1+sT_p)(1-0,25s)(18,79s+13,57)}$$

A fenti átviteli függvény karakterisztikus egyenlete pedig a következő lesz:

$$K(s) = (1 + 0,25s)s(s^2 + 14s + 88,56) + 10(1 + sT_p)(1 - 0,25s)(18,79s + 13,57) = 0,$$

vagyis, elvégezve a fenti kijelölt műveleteket:

$$K(s) = -46,975T_p s^3 + s^2(-56,612 + 151,475T_p) + s(151,475 + 145,7T_p) + 145,7 = 0.$$

A fenti karakterisztikus egyenlet alapján határozzuk meg az 53. ábrán látható zárt szabályozási rendszer stabilitásának szükséges feltételeit, amely a karakterisztikus egyenlet együtthatóira felírt előjelszabály, vagyis:

$$a_0 = -46,975T_p > 0; \rightarrow T_p < 0$$

$$a_1 = (-56,612 + 151,475T_p) > 0; \rightarrow T_p > 0,3737s,$$

$$a_2 = (151,475 + 145,7T_p) > 0; \rightarrow T_p > -1,0396s,$$

$$a_3 = 145,7 > 0.$$

A továbbiakban vizsgáljuk meg a stabilitás elégséges feltételeit is. A karakterisztikus egyenlet együtthatóit felhasználva a zárt szabályozási rendszer Hurwitz-determinánsa most a következő lesz:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (-56,612 + 151,475T_p) & 145,7 & 0 \\ -46,975T_p & (151,475 + 145,7T_p) & 0 \\ 0 & (-56,612 + 151,475T_p) & 145,7 \end{vmatrix}$$

A főátlóra támaszkodó aldeternimánsok, és a kritikus (maximális) értékű  $T_p$  időállandók az alábbiak lesznek:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} (-56,612 + 151,475T_p) & 145,7 \\ -46,975T_p & (151,475 + 145,7T_p) \end{vmatrix} = (-56,612 + 151,475T_p)(151,475 + 145,7T_p) + 145,7(46,975T_p) > 0$$

A kritikus  $T_p$  értékeket az alábbi egyenlet megoldásai adják:

$$22069,9075 \cdot T_{pkrit}^2 + 14696,3072 \cdot T_{pkrit} - 8575,3027 = 0,$$

amelyek – a MATLAB® 'roots.m' függvényét felhasználva – az alábbiak:

$$T_{pkrit_1} = -1,0396 \text{ s}, T_{pkrit_2} = 0,3737 \text{ s}.$$

Tekintettel arra, hogy a rendszer Hurwitz-determinánsa felírható, mint

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (-56,612 + 151,475T_p) & 145,7 & 0 \\ -46,975T_p & (151,475 + 145,7T_p) & 0 \\ 0 & (-56,612 + 151,475T_p) & 145,7 \end{vmatrix} = 145,7\Delta_2,$$

így a teljes  $\Delta_3$  rendszerdetermináns a  $T_p$  időállandóra nem határoz meg új kritikus értéket.

Összefoglalva a  $T_p$  időállandóra korábban már meghatározott értékeket –  $K_p = 10$ ,  $\tau = 0,5$ s értékek mellett – az időállandó lehetséges értékei tehát az alábbi tartományon vehetnek fel értékeket:

$$T_p > 0,3737 \text{ s}.$$

Az oldalirányú-, és a hosszirányú mozgás PiL-szabályozásának eredményeit az alábbi táblázat foglalja össze:

	Oldalirányú mozgás $Y_{UAV}(s) = \frac{\phi(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{23,8289}{s(s + 19,9149)}$	Hosszirányú mozgás $Y_{UAV}(s) = \frac{\vartheta(s)}{-\delta_e(s)} = \frac{18,79s + 13,57}{s(s^2 + 14s + 88,56)}$
$\tau, [s]$	$0 < \tau < 0,9001$ ( $K_p = 10$ ; $T_p = 1 \text{ s}$ )	$0 < \tau < 1,718$ ( $K_p = 10$ ; $T_p = 1 \text{ s}$ )
$K_p$	$0 < K_p < 18,0494$ ( $\tau = 0,5$ ; $T_p = 1 \text{ s}$ )	$0 < K_p < 0,7375$ ( $\tau = 0,5$ ; $T_p = 1 \text{ s}$ )
$T_p, [s]$	$0 < T_p < 2,1268$ ( $K_p = 10$ ; $\tau = 0,5 \text{ s}$ )	$T_p > 0,3737$ ( $K_p = 10$ ; $\tau = 0,5 \text{ s}$ )

Az oldalirányú, és a hosszirányú mozgás PiL irányításának vizsgálata során kapott eredmények értékelése:

1. Mindkét irányítási csatornában az operátor  $Y_{OP}(s) = K_p(1 + sT_p)e^{-s\tau}$  átviteli függvényét használtam. Ha az UAV-operátor komplex repülési feladatot hajt végre, vagyis az UAV repülése során a számára közölt parancsjelek alapján egyidejűleg több irányítási csatornában

is beavatkozik, akkor a viselkedése inkább az  $Y_{OP}(s) = K_p e^{-s\tau}$  alakú átviteli függvénnyel írható le, mert a tevékenységében csak a számára megjelenített referencia repülési paraméterek lekövetésére koncentrál, és a predikációs képességeivel nem számolhatunk.

2. Az operátorok tevékenységét egy-egy irányítási csatornában, külön-külön vizsgáltam.
3. a  $\tau$  holtidő esetében a hosszirányú csatornában nagyobb holtidő is megengedett a stabilitás elvesztése nélkül.
4. A  $K_p$  erősítés lényeges mértékben lecsökken.
5. A  $T_p$  időállandó korlátait az oldalirányú mozgás irányítása határozza meg.

Az UAVk bizonyos osztályainál ('C', 'D', és az 'E' kategória), az UAV-kezelőkkel szemben már a hazai jog, a 38/2021. (II.2.) Korm. rendelet is repülőegészségügyi követelményeket is támaszt (56.§. (4) pont)<sup>39</sup>:

#### IV. Fejezet

#### A PILÓTA NÉLKÜLI ÁLLAMI LÉGJÁRMŰ RENDSZER KEZELÉSÉHEZ SZÜKSÉGES ENGEDÉLYEK, A KEZELŐ SZEMÉLYZET KÉPESÍTÉSÉNEK, EGÉSZSÉGI ALKALMASSÁGÁNAK KÖVETELMÉNYEI

#### 28. A kezelő személyzet engedélyei

**56. § (1)** Az „A1”-„B2” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű az adott kategóriára vonatkozó, a „C”-„E” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű az adott típusra vonatkozó képzés, sikeres vizsga és az üzemben tartó által engedélyezettnek megfelelően üzemeltethető.

(2) Szakszolgálati engedély nélkül az e rendeletben meghatározott képzési, vizsga- és egyéb követelmények teljesítése esetén üzemeltethető az „A1”-„B2” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi járművek.

(3) A „C”-„E” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű csak a típusra szóló érvényes szakszolgálati engedély és érvényes repülőegészségügyi minősítési dokumentum birtokában üzemeltethető.

(4) A szakszolgálati engedély repülőegészségügyi, valamint a szakmai alkalmasságra megállapított határidőig vagy visszavonásig hatályos.

(5) A Hatóság a pilóta nélküli állami légi jármű kezelő személyzet szakszolgálati engedélyét az e rendeletben meghatározott feltételek megjelölésénél megadja, meghosszabbítja, megújítja vagy kiterjeszti.

(6) A Hatóság az engedélyes szakszolgálati engedélyét az engedélyben foglalt feltételek megsértése esetén visszavonja, helyszíni intézkedés keretében elveheti.

(7) Hatálytalan szakszolgálati engedély vagy repülőegészségügyi minősítési dokumentum helyszíni elvételére a rendőrség is jogosult. Az elvett okmányt az eljáró rendőri szerv 7 napon belül megküldi a Hatóságnak.

egyéb más, az alábbiakban felsorolt követelmények mellett:

1. melléklet a 38/2021. (II. 2.) Korm. rendelethez

#### A pilóta nélküli állami légi járművekre vonatkozó minimális követelmények

	A	B	C	D	E
1.	Kategória	Felzálló tömeg	A pilóta nélküli állami légi járművel és a kezelő személyzettel szemben támasztott követelmények a végrehajtandó feladatok szerint	Kezelői tanfolyam minimum iskola követelménye	Egyéb képesség
2.	<b>E</b>	600 kg felett	1. Típusalkalmassági bizonyítvány 2. Szakszolgálati engedély	Felsőfokú képesség	
3.	<b>D</b>	150 kg fölött és 600 kg-ig	3. Állami légi jármű nyilvántartásba vételi bizonyítvány 4. Légialkalmassági bizonyítvány 5. Repülésbiztonsági szervezet 6. Fel- és leszállás ellenőrzött repülőtéren („C” kategóriába tartozó pilóta nélküli állami légi jármű esetén ellenőrzött repülőtéren kívül is) 7. Kétirányú rádiókapcsolat biztosítása 8. Transzponder használata 9. Ütközésre figyelmeztető rendszerrel („C” kategória esetén, ha ellenőrzött légtérben üzemel)	Középfokú képesség	Angol nyelvű rádiótávbeszélő engedély
4.	<b>C</b>	25 kg fölött és 150 kg-ig			
5.	<b>B</b>	4 kg fölött és 25 kg-ig	<b>B1</b> 1. Üzemben tartói nyilatkozat 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele <b>B2</b> 1. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele 2. Típusalkalmassági bizonyítvány vagy EU jogszabályi megfelelést igazoló gyártói CE jelölés vagy hatóság által kiadott tanúsítvány 3. Repülésbiztonsági szervezet 4. Kockázatelemzés		
6.	<b>A</b>	4 kg és az alatt	<b>A1</b> 1. Üzemben tartói nyilatkozat 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele <b>A2</b> 1. Hatóság által jóváhagyott intézkedés 2. Üzemben tartó nyilvántartásba vétele 3. Repülésbiztonsági szervezet 4. Kockázatelemzés	Alapfokú képesség	

<sup>39</sup> <https://njt.hu/jogszabaly/2021-38-20-22>. Letöltve: 2024. 11. 28.

A fentiek alapján tehát megállapíthatjuk, hogy az emberi veselkedés matematikai modellezése, az operátorok, UAV kezelők tevékenységének vizsgálata segíti a PiL-szabályozási feladatok megoldását, valamint lehetővé teszi a korábbi évtizedekben identifikált matematikai modellek és azok paramétereinek pontosítását, korrekcióját is.

### Kérdés

- Végül sajnálatos, hogy hol kereszt- (PID, LQR,  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$ ) hol pedig hosszdinamikára mutatta be a tervezéseket (ÁVCS, LQG) így az összes módszer végső összevetésének és összegző értékelésének a lehetősége elmaradt. A feltett kérdések sokaságára való tekintettel ennek pótlását már nem kérem a Szerzőtől.

**Válasz:** A különféle szabályozótervezési módszerek bemutatásakor és azok alkalmazása során célom volt egy kiválasztott UAV típusnak (Trainer-60) úgy a hosszirányú-, mint az oldalirányú mozgását is vizsgálni.

Az egyes tervezési módszerek összehasonlítása és értékelése nem volt célom, mivel e dolgozat nem egy konkrét UAV típus, hanem a kisméretű, SUAVk osztályába tartozó UAVk repülésszabályozó rendszereinek, robotpilótái szabályozójának előzetes számítógépes tervezésére fókuszált, függetlenül azok típusától.

Még egyszer nagy tisztelettel megköszönöm Dr. Bauer Péter úr opponensi munkáját, és arra kérem, hogy a kérdéseire és az észrevételeire adott válaszaimat elfogadni szíveskedjen!

Budapest, 2024. november 27.



Szabolcsi Róbert