

# VÁLASZ

**Prof. Dr. Szabó Zoltán, egyetemi tanár úr bírálataiban megfogalmazott kérdésekre és észrevételekre**

a

## **„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 Szabó professzor úrnak az opponensi munkáját, és az opponenciájában feltett kérdéseket és észrevételeket, amelyekre az alábbiakban foglaltak szerint szeretnék válaszolni.

### **1. Az értekezés 3. fejezetével kapcsolatban feltett kérdés: „a felmérés óta eltelt időre tekintettel (2007) mennyire helytállóak ma a felmérés egyes következtetései?”**

#### **A feltett kérdésre válaszom a következő:**

- A 2007. évi felmérés idején még nem létezett:
  - a NATO STANAG 4671 (Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR)), ami szinte első szabvány/szabályként 2009-ben lépett hatályba, amit Magyarország 2008-ban ratifikált, de nem vezetett be a hazai jogrendszerbe;
  - az EMAR (European Military Airworthiness Requirements) 21, 66, 145, 147 légi alkalmassági követelményrendszer;
  - az EU 2019/945, 2019/947 direktívái;
  - 'A pilóta nélküli állami légi járművek repüléséről' szóló 38/2021. (II.2.) Korm. rendelet.
- A 2007. évi felmérés papíralapú volt: a válaszadásra felkért szakemberek hagyományos, nyomtatott kérdőívet töltöttek ki, és küldték vissza kiértékelésre.
- A 2007. évi felmérés alapvető célja az volt, hogy vizsgálja a hazai lehetséges állami célú UAV alkalmazásokat, a lehetséges felhasználók elvárásait, az általuk támasztott műszaki-, földi és légi üzemeltetési elvárásokat, valamint egyéb, az UAVk tervezése (esetleges beszerzése) szempontjából fontos műszaki performanciákat.
- A 2007. évi és az UAV/UAS rendszerek alkalmazhatóságával kapcsolatos felmérés az UAV/UAS rendszerekről való gondolkodás az akkori állapotokat tükrözi. A 2007-ben elfogadott felfogás szerint az UAV/UAS rendszerek alkalmazása területeit két nagy csoportra osztották. Megkülönböztettek polgári-, és katonai UAV/UAS alkalmazásokat, mert abban a

korban az UAVk szélesebb körű alkalmazásairól szinte kizárólag csak katonai értelemben beszélhettünk. A katonai alkalmazások pedig jórészt a felderítési feladatok ellátására korlátozódtak (RQ-11/RQ-11B 'Raven', Elbit Skylark), bár már ebben az időben megjelentek a harcászati célú UAV/UAS-ek (pl. RQ-1/MQ-1A 'Predator', MQ-9A 'Reaper') is.

- A felmérés óta eltelt időszakban az UAVk egyre szélesebb körű alkalmazása miatt megváltozott a szakmai gondolkodás, és az UAVk lehetséges alkalmazását már az 'állami célú', és a 'nem állami célú' alkalmazások köré szokás csoportosítani.
- Napjainkban az 'állami célú' UAV/UAS rendszerek alkalmazása jóval túlmutat a katonai alkalmazásokon. Az UAVkat ma már széles körben alkalmazza a NAV (jövedéki termékek csempészete), a Rendőrség (bűnüldözési feladatok, közlekedésrendészet), Katasztrófavédelem (árvízvédelmi felderítési feladatok, 2010, 2013), Magyar Honvédség (határőrizeti feladatok) és más, kulcsfontosságú állami szerv (mezőgazdasági földterületek monitoringja, mezőgazdasági területek felmérése).
- Az állami célú (katonai, rendőri, katasztrófavédelmi, és egyéb célú) UAV/UAS rendszerek alkalmazása terén a 2007. évi felmérés adatait visszaigazolta az élet: a 2007.-ben szinte kizárólag katonai célú UAV/UAS alkalmazások és repülések mellett számottevővé vált egyéb állami szervezetek szerepvállalása is, az UAV/UAS rendszerek alkalmazása szélesebb körben valósul meg.
- Tekintettel arra, hogy a felmérés olyan kérdéseket is érintett, mint az UAVk lehetséges propulziós, hajtómű rendszerei, látva az alkalmazott hazai UAV eszközöket (SUAV, villamos hajtás, multirotoros elrendezés), a felmérés adatai máig relevánsak e területen, a felmérés eredményi hazai trendeket vetítettek előre.
- Az UAV/UAS rendszerek katonai alkalmazása terén időközben bekövetkezett változások, új alkalmazások (pl. cirkáló lőszer koncepció) megjelenése miatt a felmérés eredményeinek egy része ma már nem releváns. Ilyen performancia például az ismételt repülésekre (bevetésekre) felkészítés időszükséglete, vagy az UAV/UAS rendszerek indításához szükséges repülés előtti felkészítési idő, ugyanis ezen UAV/UAS rendszerek indítása sokszor előkészített, kazettás rendszerben történik, és az UAV/UAS rendszer leszállása nem tervezett. Megemlítem, hogy az egyszer használatos UAV drónok alkalmazása
- Az 'állami célú' alkalmazások területén – egyelőre – még várat magára az UAV/UAS rendszerek alkalmazása a nemzeti parkok, a vízügyi igazgatóságok, a természetvédelmi területek, a növényvilág, az állatvilág megfigyelése, valamint a klíma, és a klímaváltozással kapcsolatos adatgyűjtések terén.
- A 'nem állami' célú repülések terén is óriási mértékben fejlődött az UAV/UAS piac, ami napjainkban főként a precíziós mezőgazdasági igények kielégítését jelenti (felderítés, permetezés). E területen a felmérés eredményei relevánsak, és fontosak úgy az UAVk beszerzése, mint az üzemeltetésük terén is, a hatékonyság javítása érdekében.

- A 'nem állami célú' UAV/UAS rendszerek egyik ígéretes alkalmazása a különféle logisztikai-, és szállítási feladatok végrehajtása, ami az UAV/UAS rendszerek tervezésén, gyártásán, és használatának kérdésein túl olyan problémákat is feszeget, mint az UAV/UAS rendszerek integrálása a légiközlekedésbe.

A 2007. évi felmérés az UAVk széleskörű hazai felhasználását vizsgálta, ami kiindulási alapot adott a különféle célra szánt UAV/UAS rendszerek koncepcionális tervezéséhez.

Az UAV/UAS rendszerek tervezésében és gyártásában ma már sokszor nem maga a tervezés, a gyártás, vagy éppen az üzemeltetés a legnagyobb mérnöki-tervezői szakmai és tudományos kihívás, hanem a méretek drasztikus csökkenése, valamint az alkalmazók nem feltétlenül 'jó' szándéka miatt az UAVk elleni tevékenység, azok felderítése, és az állami célú katonai alkalmazások során az ellenséges célú UAV/UASk hatástalanítása, vagy megsemmisítése jelenti a legnagyobb tudományos-, és szakmai kihívást.

## **2. Az értekezés 6. és 7. fejezetével kapcsolatban feltett kérdések:**

- 2.1. „A fejezet folytonos idejű modellekre tartalmaz eredményeket. Az implementáció során mennyire befolyásolja az eredményeket a diszkretizáció (mintavételi idő)?”
- 2.2. „Mennyire alkalmasak az agresszív manőverek tervezésére/kivitelezésére a felvonultatott módszerek?”

### **A kérdés első, 2.1. részére vonatkozó válaszom a következő:**

A folytonos idejű rendszermodellek diszkrét idejű modellek történő konverziója során egyik nagy kihívás a mintavételezési idő, vagy frekvencia helyes felvétele.

A megfelelő mintavételezési idő meghatározására több módszer is kínálkozik:

- ha ismert a folytonos, önbeálló rendszer átmeneti függvénye, akkor az inflexió ponthoz húzott érintő segítségével a  $T_0$  mintavételezési idő már könnyen meghatározható:  $T_0 \leq T/10$ , ahol  $T$  a beállási idő.
- ha a folytonos rendszer zajjal terhelt, akkor megkeressük azt a legnagyobb frekvenciát, ami még érdemben befolyásolja a modellalkotást, és a Fourier-sorban a legnagyobb frekvenciájú jel periódusidejének 1/20 részével számolunk.

A nem megfelelő mintavételezési frekvencia az alább kísérő jelenséggel járhat:

- túlságosan nagy mintavételezési frekvencia esetén a túlméretezés miatt előálló nagyszámú, 'felesleges' adat, és annak a későbbi feldolgozása nagyobb számítási igényt és nagyobb számítási teljesítményt követel meg;
- az alulméretezett mintavételezés esetén előfordulhat, hogy az eredeti folytonos rendszer modelljét a diszkrét adatokból nem sikerül megfelelő pontossággal rekonstruálni.

Bár a dolgozat folytonos rendszermodelleket használt, és az rendelkezésre álló kisméretű UAV identifikált modelljei rendelkezésre álltak, felmerül a kérdés, hogy ebben az esetben, mi az a

mintavételezési frekvencia, amit elfogadunk, mint 'jó' értéket, az egyik meghatározó UAV robotpilóta gyártó javaslata az 1. ábrán látható adattáblán látható.

**MicroPilot**  
World Leaders in Small UAV Autopilots

[www.micropilot.com](http://www.micropilot.com)  
[info@micropilot.com](mailto:info@micropilot.com)  
+1.204.344.5558  
Copyright 2005 MicroPilot

## Specifications

### Servos

- elevon, flaperons, 4 servo flap/aileron, separate flaps, v-tail, x-tail, split rudders
- 8 / 16 / 24 servos
- 50 Hz servo update rate
- separate servo and main battery power supply
- separate voltage monitor for main and servo battery power supplies
- integrated RC override
- 11 bit servo resolution
- extra ADC channels and 3-axis magnetometer available as an option

### Navigation

- 1 Hz GPS update rate
- move servo at waypoint
- change altitude at waypoint
- change airspeed at waypoint
- user definable holding patterns
- user definable error handlers
- RPV and UAV modes
- supports DGPS accuracy
- 1000 waypoint command buffer

### Telemetry, Datalog & Video

- telemetry (100 user defined fields transmitted each second)
- 5 Hz telemetry update rate
- onboard datalog: 47 fields, 1.5 MB
- 5 Hz datalog update rate
- video overlay (16 user definable fields)

### Control System

- 30 Hz PID loop update rate
- gain scheduling for optimum performance
- rudder aileron feed forward for improved turn performance
- aileron elevator feed forward for improved altitude hold during turns
- autonomous takeoff and landing
- user definable PID feedback loops
- user definable table lookup functions
- MP plugin compatible

### HORIZON<sup>MP</sup>

- HORIZON<sup>MP</sup> ground control software included with system
- MP2028<sup>g</sup> simulator for operator training
- in-flight adjustable gains
- change waypoints in-flight
- payload servos controlled from ground station
- point and click waypoint editor

1. ábra. Az MP2028g Miniature UAV Autopilot

Forrás: <https://www.micropilot.com/pdf/mp2028g.pdf>. letöltve: 2024. szeptember 2.

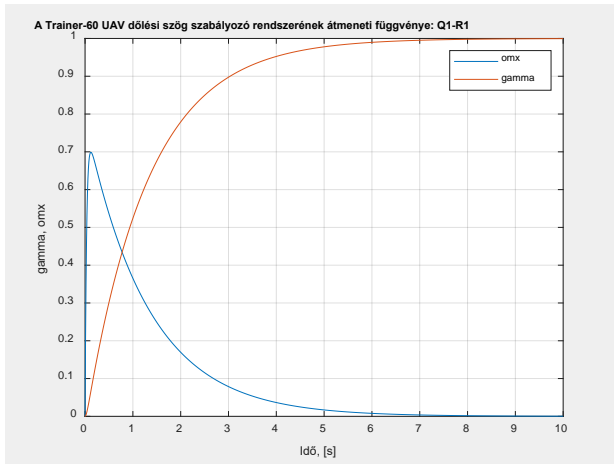
A gyártó az UAV PID-szabályozó hurokjaiban  $f = 30 \text{ Hz}$  mintavételezési frekvenciát javasol. Tekintettel arra, hogy a Trainer-60 UAV is a 'Small' kategóriába tartozik, így elfogadjuk a gyártó ajánlását az általuk is alkalmazott mintavételezési frekvenciára.

Az UAV vizsgálandó zárt szabályozási rendszerének mintavételezése során, tekintettel a zárt szabályozási rendszer viselkedésére és a minőségi jellemzőire, valamint figyelembe véve a MicroPilot robotpilótákban alkalmazott mintavételezési alappfrekvenciát, a további vizsgálataimhoz az alábbi, általam javasolt mintavételezési frekvenciákkal számolok:

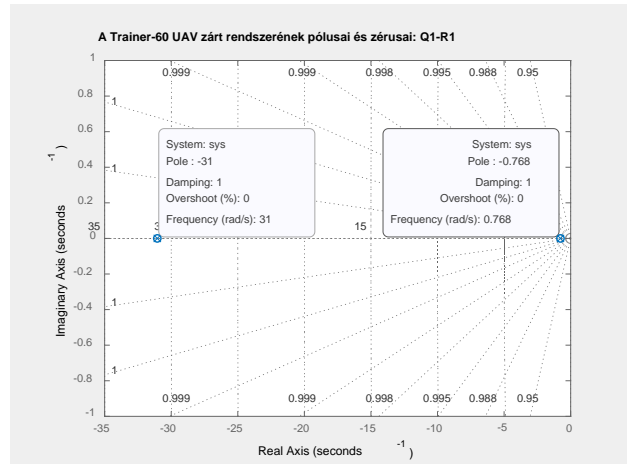
- mintavételezési alappfrekvencia:  $f = 30 \text{ Hz}$ ;
- 'alulmintavételező' frekvencia:  $f = 10 \text{ Hz}$ ;
- 'túlmintavételező' frekvencia:  $f = 50 \text{ Hz}$ .

## I. A folytonos rendszer átmeneti függvényei

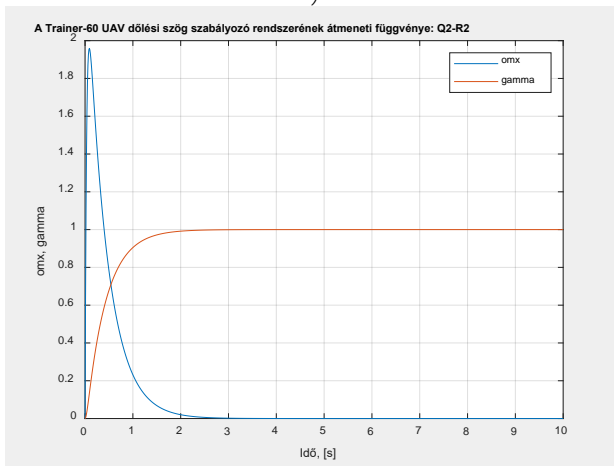
A Trainer-60 kisméretű UAV folytonos zárt szabályozás rendszerének átmeneti függvényeit és minőségi jellemzőit a 2. ábrán láthatjuk.



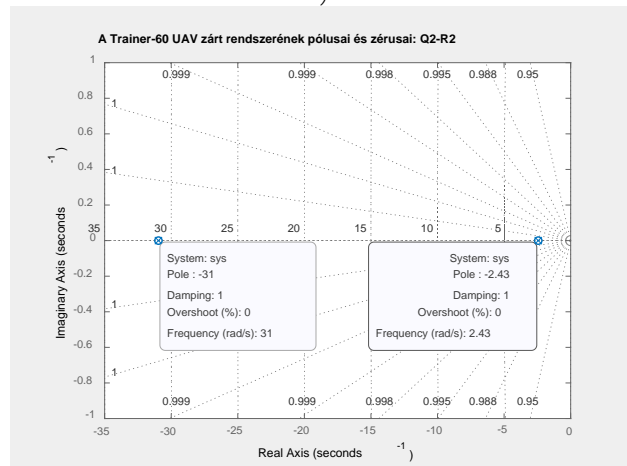
a)



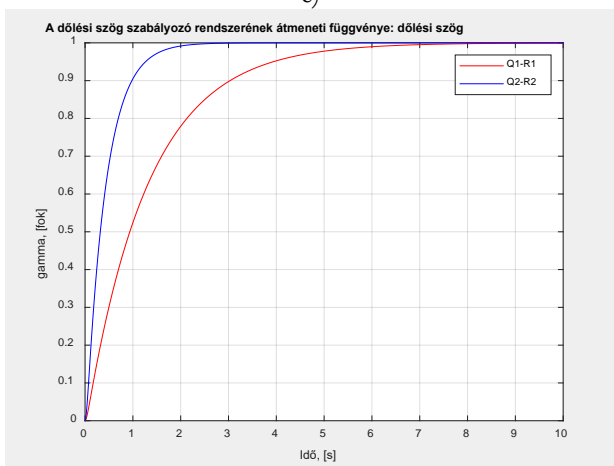
b)



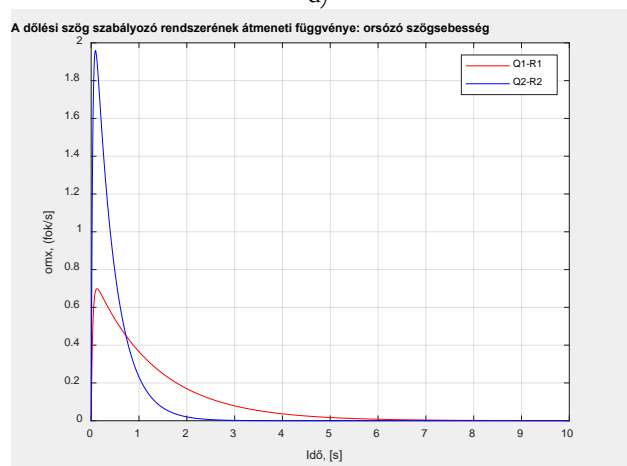
c)



d)



e)



f)

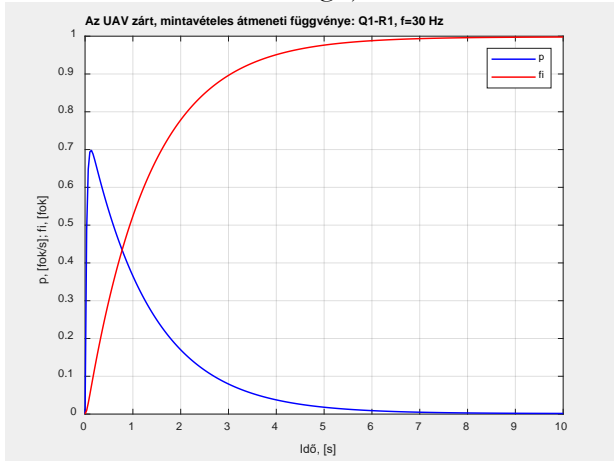
2. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos zárt szabályozási rendszerének viselkedése.

A 2. ábra alapján könnyű belátni, hogy a szabályozótervezés során felvett  $Q2 - R2$  súlyozás lényeges mértékben csökkentette a transziens időt, gyorsította az UAV zárt szabályozási rendszerének a beállítását, bár a transziens kezdetén az orsózó szögsebesség jóval gyorsabban

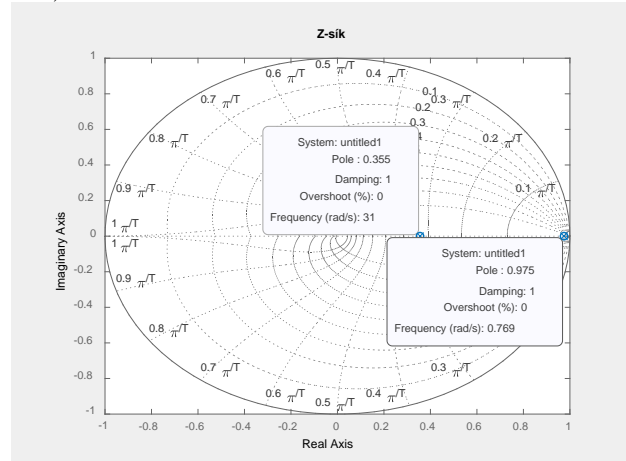
változik, az egységnyi súlyozáshoz képest. A folytonos, zárt szabályozási rendszer egyik pólusa a komplex síkon a  $p_1 = -2,43$  helyre esik, ami kisértékű tartalékokra utal. Ha a meglévő tartalékok nem elégítik ki a tartalékokra (erősítés és fázis) előírt követelményeket, akkor új szabályozó felvételére van szükség.

## II. Rendszervizsgálat a mintavételezési $f = 30 \text{ Hz}$ alappfrekvencián

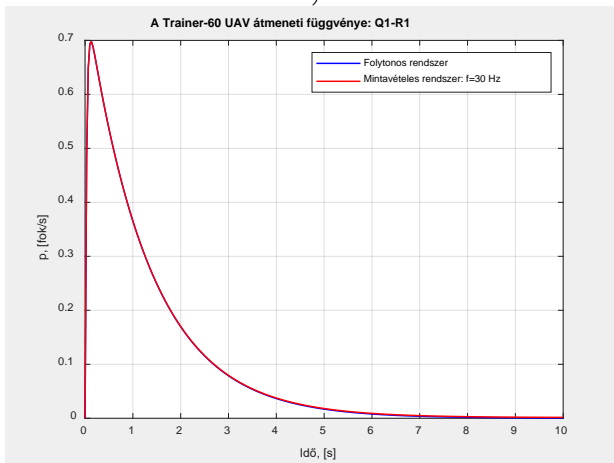
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q1-R1' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 3. ábra mutatja be.



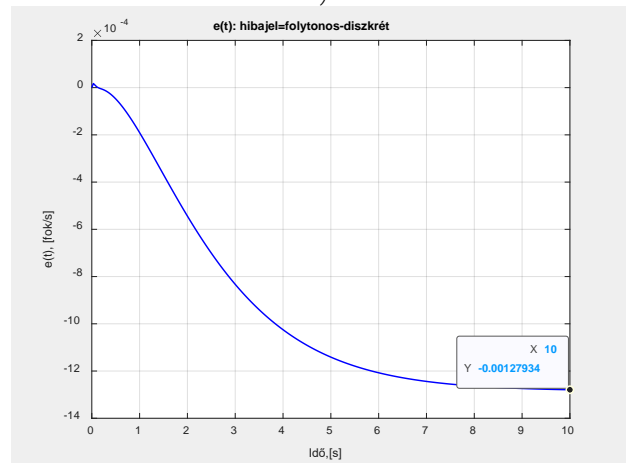
a)



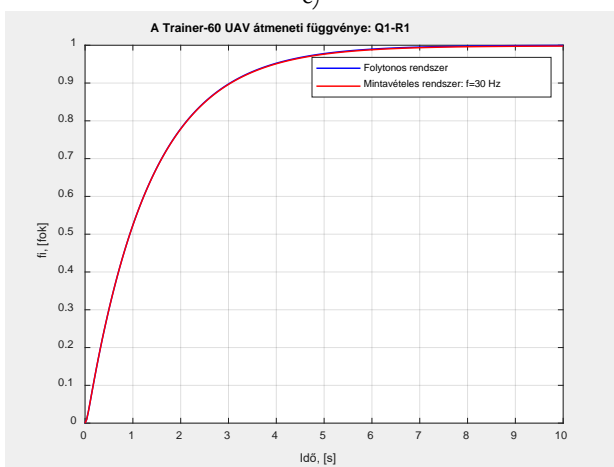
b)



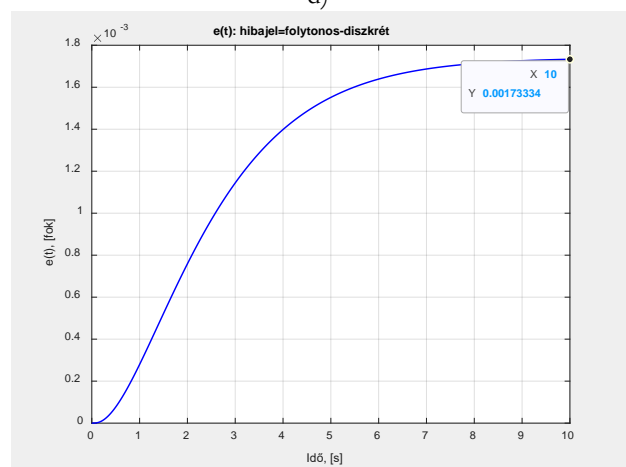
c)



d)



e)



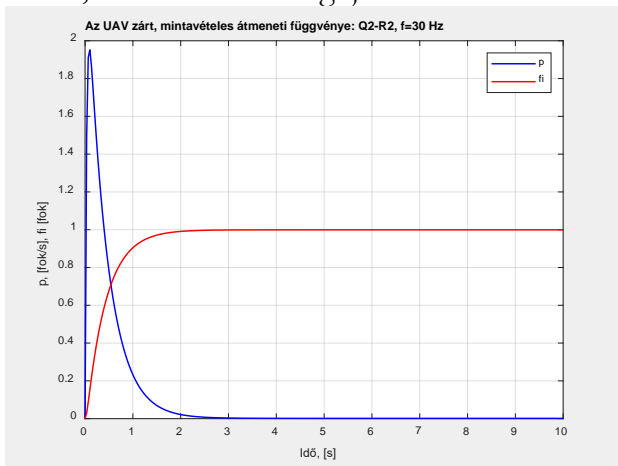
f)

3. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

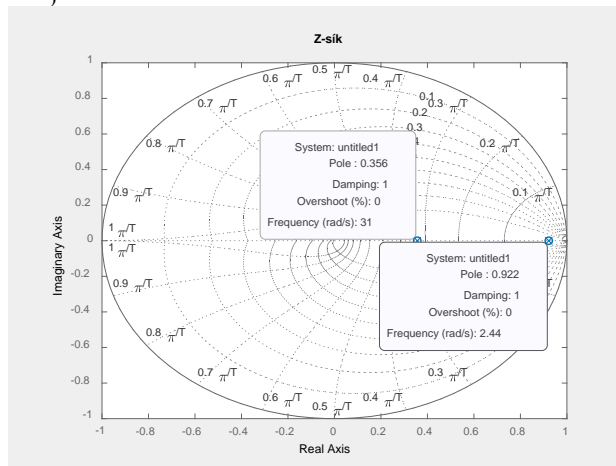
A 3. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (3. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (3. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,355$ , és  $z_2 = 0,975$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) Bár a mintavételes, zárt szabályozási rendszer stabilis, de a  $z$ -karakterisztikus egyenlet  $z_2$  gyöke nagyon közel helyezkedik el az egységnyi sugarú kör vonalához, ami egyben a stabilis működés határát is jelenti.
- 3) Ha a jelenleg meglévő tartalékokra előírnak értékeket és szigorúbb követelményeket támasztanak, akkor előfordulhat, hogy a zárt szabályozás szabályozóját újra kell tervezni.
- 4) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (3. c) ábra), mint az orsózó szög (3. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (3. d) és 3. f) ábrák).
- 5) Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = 1,27934 \cdot 10^{-7} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 1,73334 \cdot 10^{-6} \text{ fok}$ .
- 6) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja.
- 7) Megemlíteni szükséges, hogy a performanciák, a minőségi jellemzők tekintetében az UAVk automatikus repülésszabályozó rendszereire máig nincs kidolgozott, egységes szabály-, vagy szabvány rendszer, de a rendelkezésre álló előzetes adatok és tapasztalatok nagyban segíthetik az UAV robotpilóták előzetes számítógépes tervezését.
- 8) Ily módon, az UAV robotpilóták tervezése során a tervező maga állít fel követelményrendszert, amire tervezi a zárt szabályozási rendszereket.
- 9) Sok robotpilóta tervező és forgalmazó ma már automatikusan önhangoló, optimális robotpilótákat tervez, és a kis UAV kategóriában a robotpilóták máig PID-szabályozókat használnak.

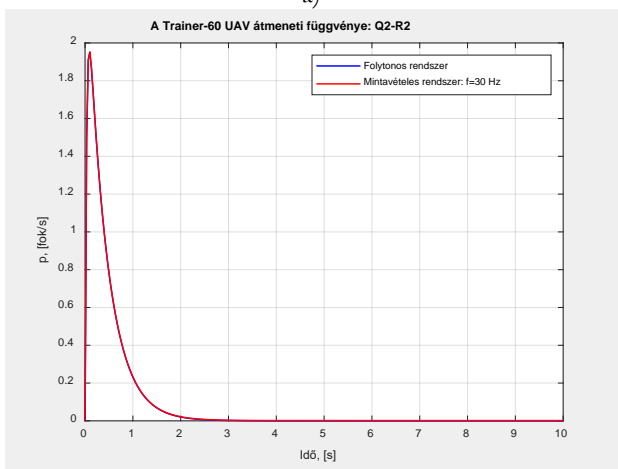
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q2-R2' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 4. ábra mutatja be.



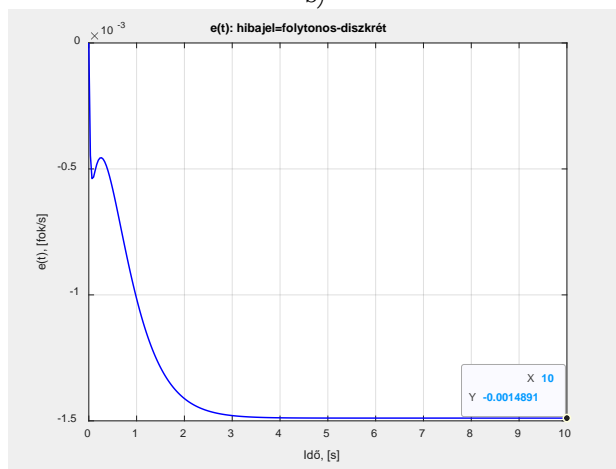
a)



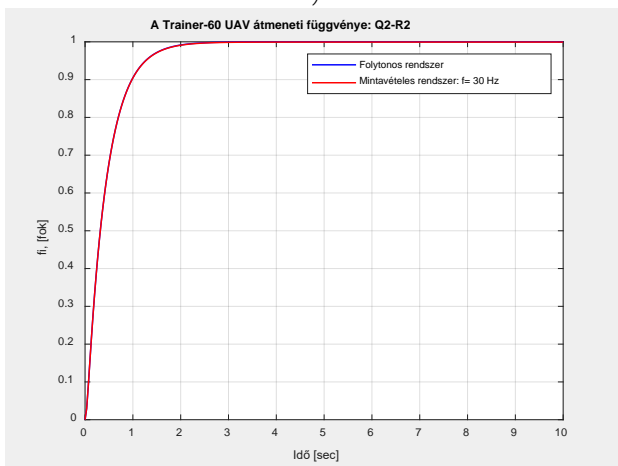
b)



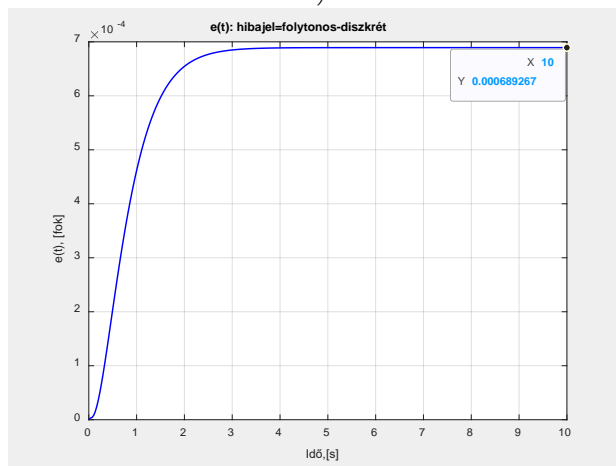
c)



d)



e)



f)

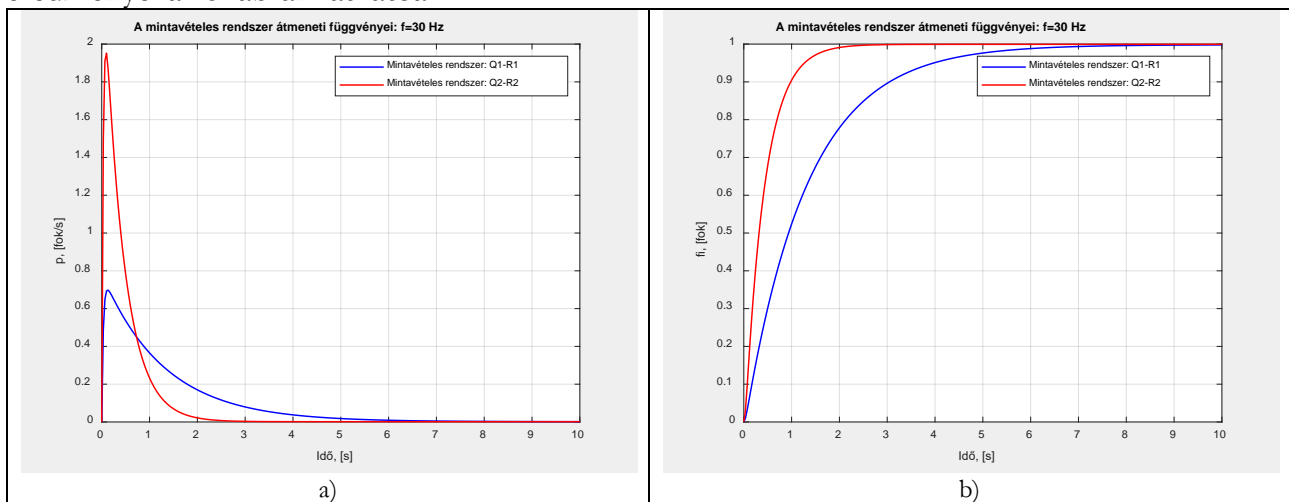
4. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.



A 4. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (4. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (4. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,356$ , és  $z_2 = 0,922$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) A 'Q2-R2' súlyozással tervezett rendszer  $z$ -karakterisztikus egyenletének  $z_2$  gyöke távolodott az egységnyi sugarú kör vonalától, ami egyben a tartalékok növekedését jelenti.
- 3) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (4. c) ábra), mint az orsózó szög (4. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (4. d) és 4. f) ábrák). Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = -1,4891 \cdot 10^{-7} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 6,89267 \cdot 10^{-8} \text{ fok}$ .
- 4) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja sem a zárt szabályozási rendszer stabilitását, sem pedig annak minőségét, performanciáit.

A továbbiakban vizsgáljuk meg, hogy a szabályozótervezés során alkalmazott különféle súlyozó mátrixok hogyan befolyásolják a mintavételes rendszer viselkedését. A számítógépes szimuláció eredményei az 5. ábrán láthatóak.

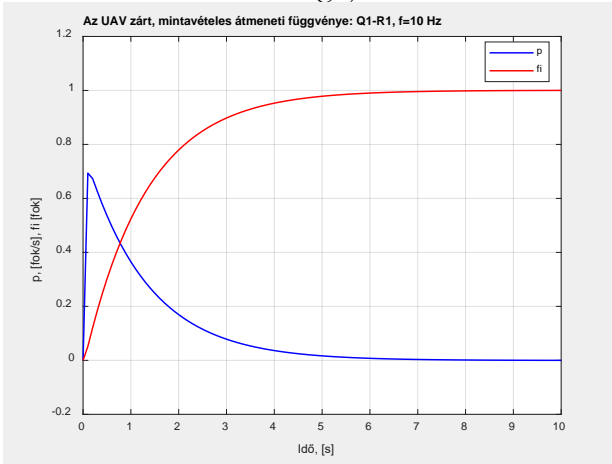


5. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

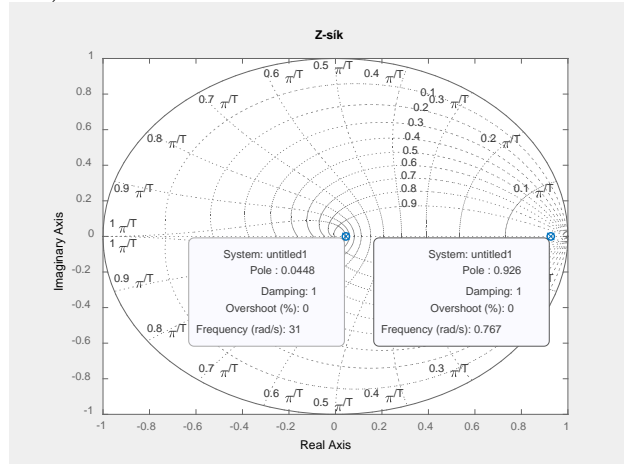
Az 5. ábrán jól látható, hogy a súlyozó mátrixok értékei nagyban befolyásolják a mintavételes zárt szabályozási rendszer viselkedését. A zárt, mintavételes rendszer működése és minőségi jellemzői, performanciái tekintetében a szabályozótervezés során alkalmazott súlyozás az, ami meghatározza a rendszer viselkedését.

### III. Rendszervizsgálat az 'alulmintavételező' $f = 10 \text{ Hz}$ frekvencián

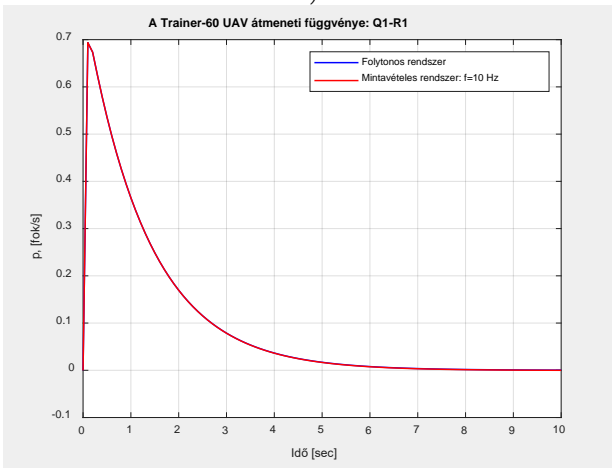
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q1-R1' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 6. ábra mutatja be.



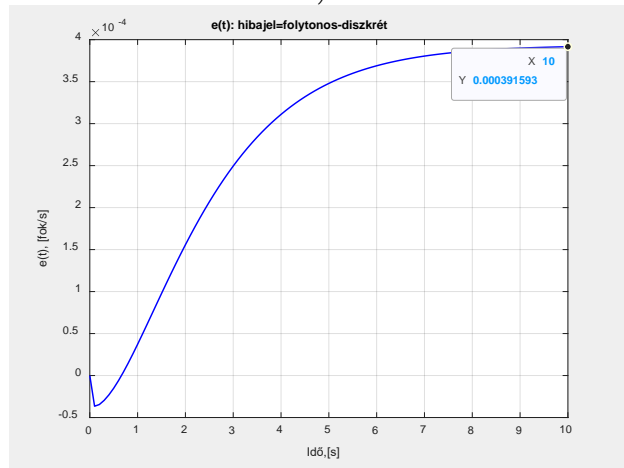
a)



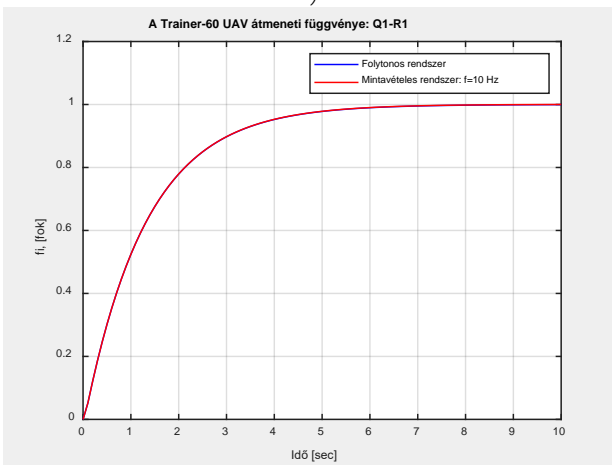
b)



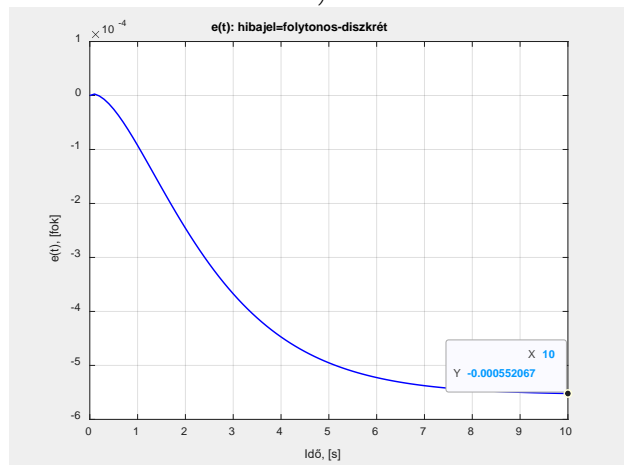
c)



d)



e)



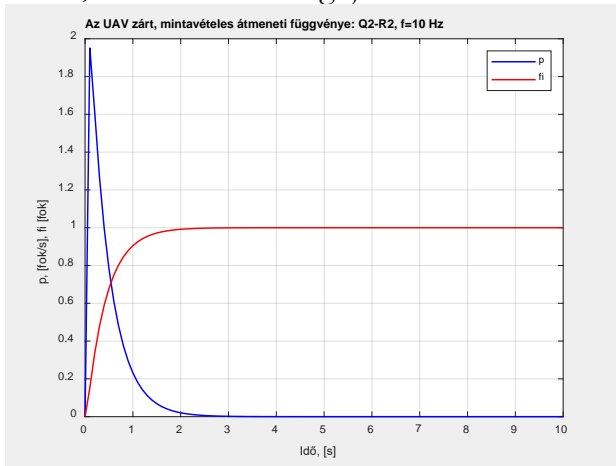
f)

6. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

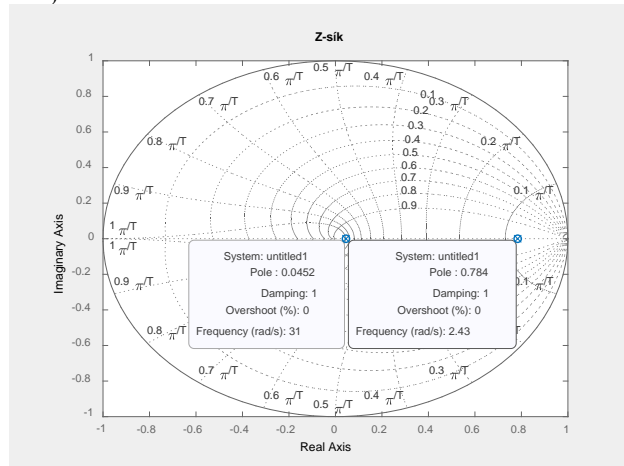
A 6. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (6. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (6. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,0448$  és  $z_2 = 0,926$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) Bár a mintavételes, zárt szabályozási rendszer stabilis, de a  $z$ -karakterisztikus egyenlet  $z_1$  gyöke nagyon közel helyezkedik el az origóhoz.
- 3) Ha a jelenleg meglévő tartalékokra előírnak értékeket és szigorúbb követelményeket támasztanak, akkor előfordulhat, hogy a zárt szabályozás szabályozóját újra kell tervezni.
- 4) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (6. c) ábra), mint az orsózó szög (6. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (6. d) és (6. f) ábrák).
- 5) Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = 3,91593 \cdot 10^{-8} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 5,52067 \cdot 10^{-8} \text{ fok}$ .
- 6) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja.

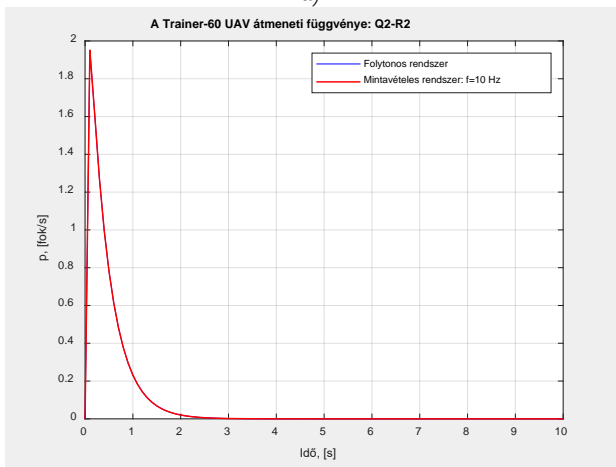
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q2-R2' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 7. ábra mutatja be.



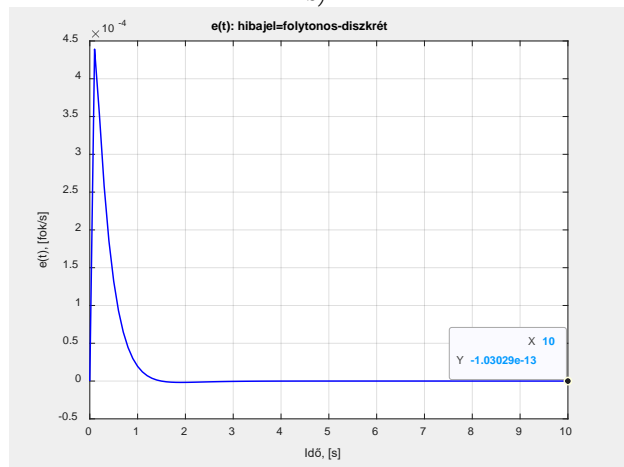
a)



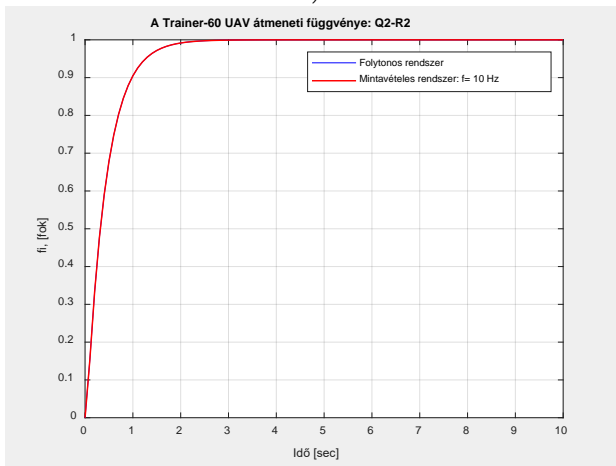
b)



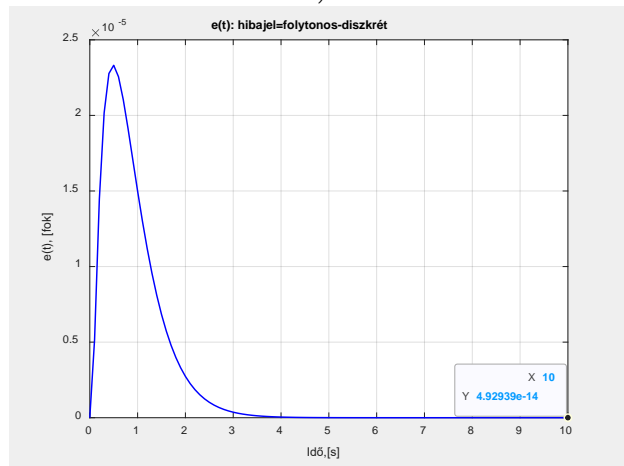
c)



d)



e)



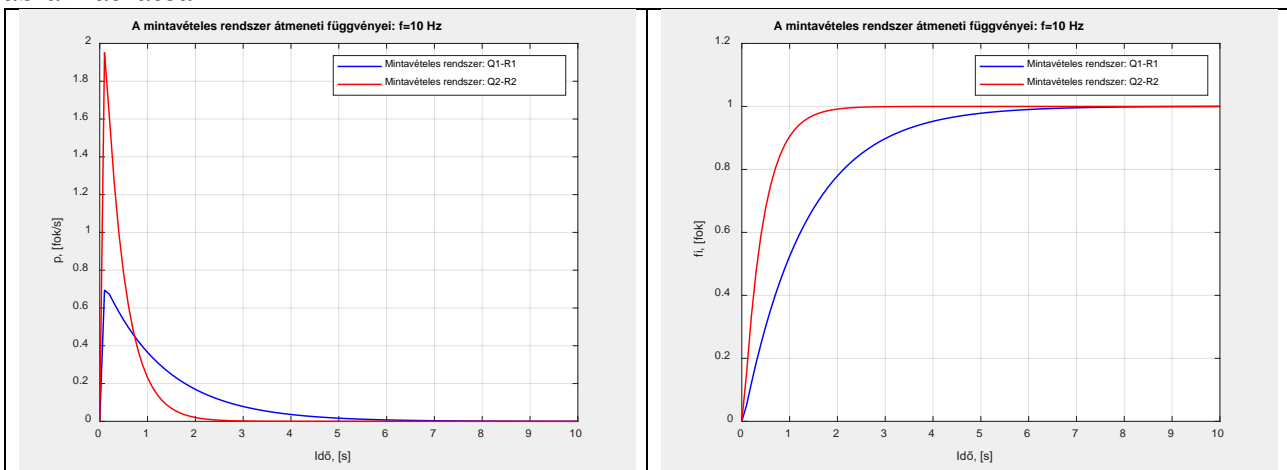
f)

7. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

A 7. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (7. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (7. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,0452$  és  $z_2 = 0,784$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) Bár a mintavételes, zárt szabályozási rendszer stabilis, de a  $z$ -karakterisztikus egyenlet  $z_1$  gyöke most is nagyon közel helyezkedik el az origóhoz.
- 3) Ha a jelenleg meglévő tartalékokra előírnak értékeket és szigorúbb követelményeket támasztanak, akkor előfordulhat, hogy a zárt szabályozás szabályozóját újra kell tervezni.
- 4) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (7. c) ábra), mint az orsózó szög (7. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (7. d) és (7. f) ábrák).
- 5) Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = -1,03029 \cdot 10^{-17} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 4,92939 \cdot 10^{-19} \text{ fok}$ .
- 6) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja.

Vizsgáljuk meg, hogy a szabályozótervezés során alkalmazott különféle súlyozó mátrixok hogyan befolyásolják a mintavételes rendszer viselkedését. A számítógépes szimuláció eredményei a 8. ábrán láthatóak.

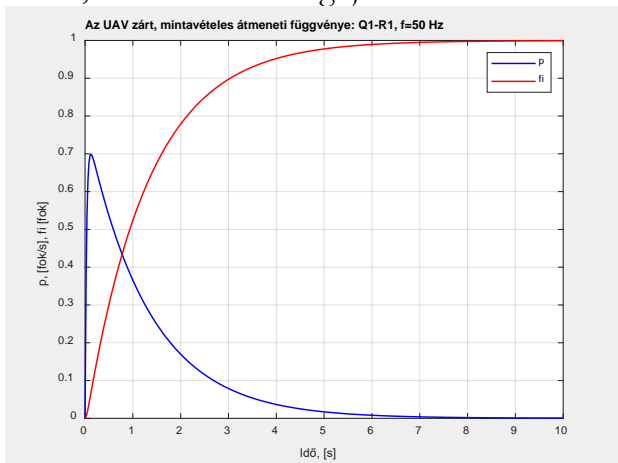


8. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

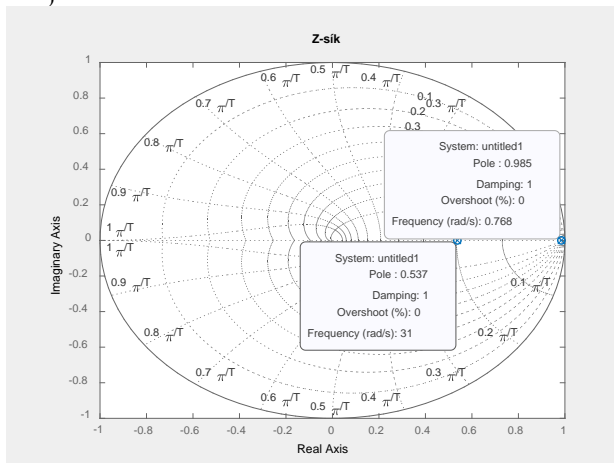
A 8. ábrán jól látható, hogy a súlyozó mátrixok értékei nagyban befolyásolják a mintavételes zárt szabályozási rendszer viselkedését. A zárt, mintavételes rendszer működése és minőségi jellemzői, performanciáinak változása tekintetében a szabályozótervezés során alkalmazott súlyozás az, ami meghatározza a rendszer viselkedését, mintsem a mintavételezés frekvenciája.

#### IV. Rendszervizsgálat a 'túlmintavételező' $f = 50 \text{ Hz}$ frekvencián

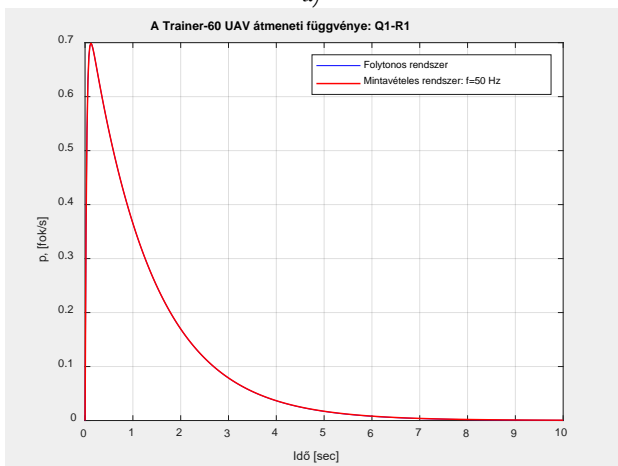
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q1-R1' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 9. ábra mutatja be.



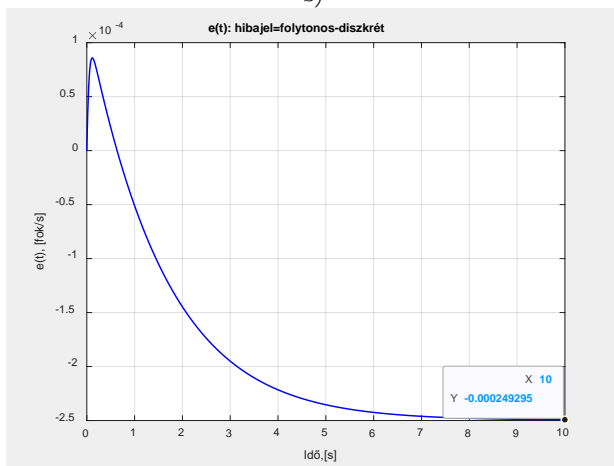
a)



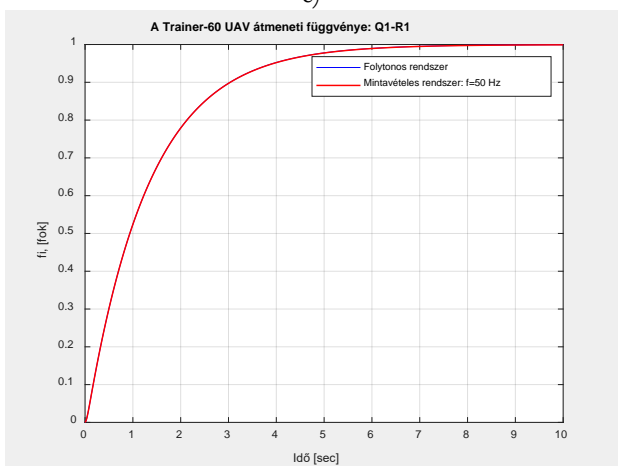
b)



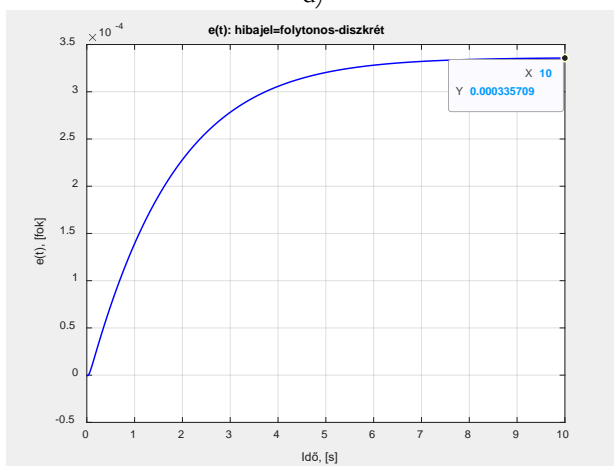
c)



d)



e)



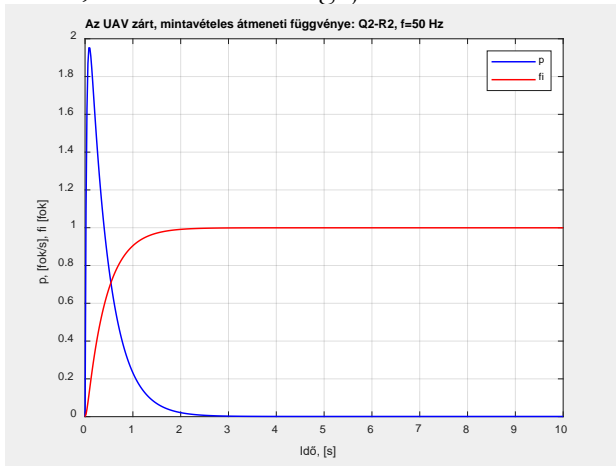
f)

9. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

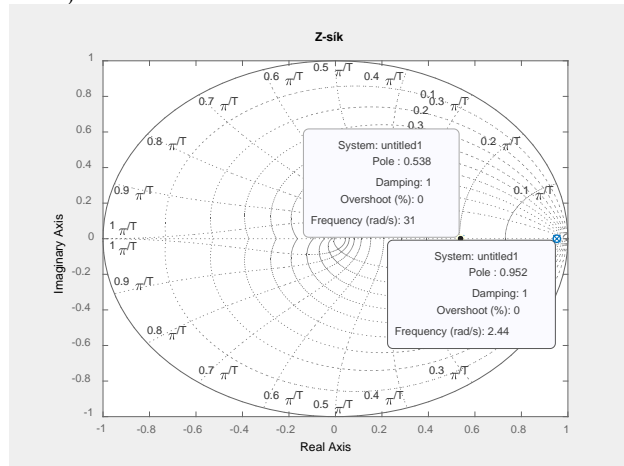
A 9. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (9. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (9. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,537$  és  $z_2 = 0,985$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) Bár a mintavételes, zárt szabályozási rendszer stabilis. megállapíthatjuk, hogy a mintavételezési frekvencia növelése a  $z$ -karakterisztikus egyenlet korábbi  $z_1 = 0,0452$  gyökét a  $z$ -síkon az origótól lényeges mértékben távolította el.
- 3) Ha a jelenleg meglévő tartalékokra előírnak értékeket és szigorúbb követelményeket támasztanak, akkor előfordulhat, hogy a zárt szabályozás szabályozóját újra kell tervezni.
- 4) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (9. c) ábra), mint az orsózó szög (9. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (9. d) és (9. f) ábrák).
- 5) Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = 2,49295 \cdot 10^{-8} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén, a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 3,35709 \cdot 10^{-8} \text{ fok}$ .
- 6) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja.

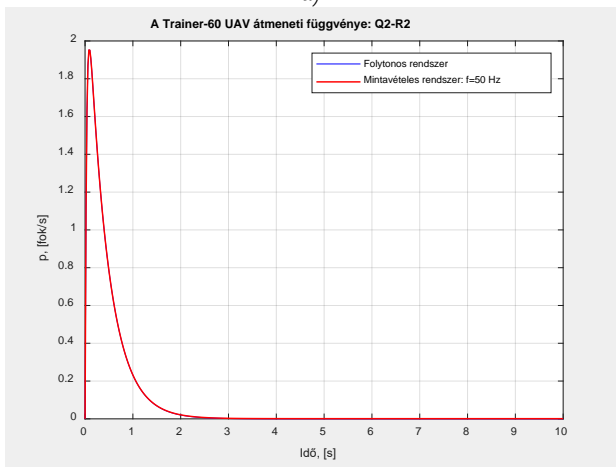
Az UAV zárt mintavételes szabályozási rendszerének átmeneti függvényeit a 'Q2-R2' súlyozás mellett, és annak minőségi jellemzőit a 10. ábra mutatja be.



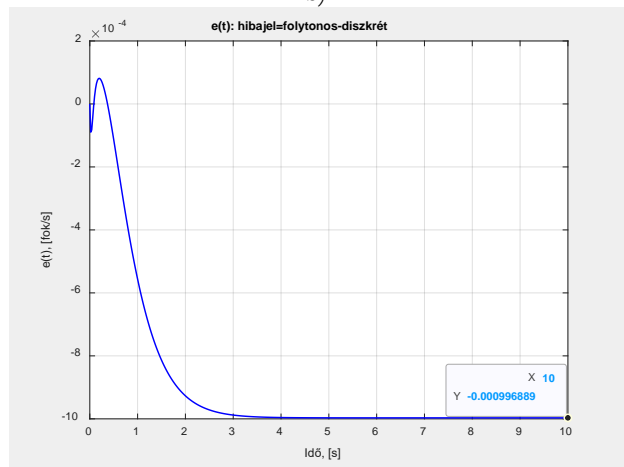
a)



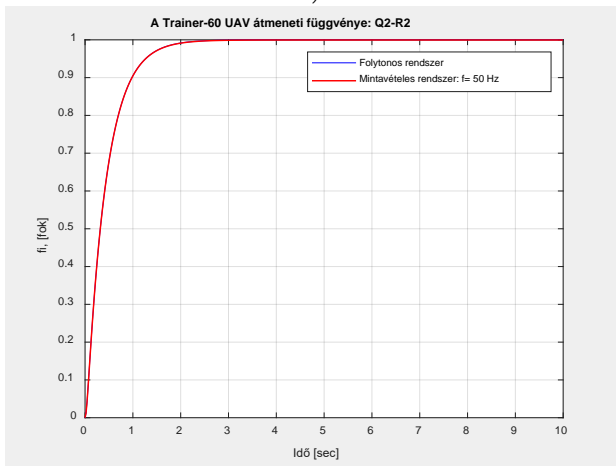
b)



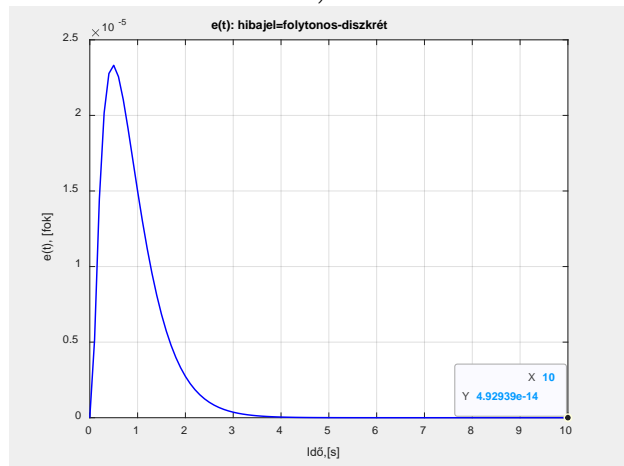
c)



d)



e)



f)

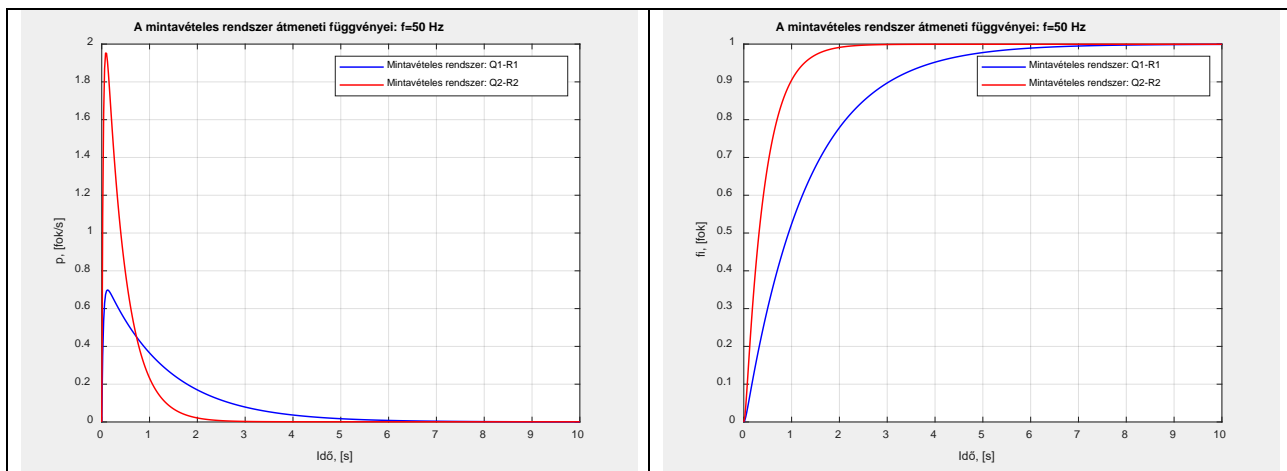
10. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.



A 10. ábrán látható eredmények értékelése:

- 1) a folytonos idejű, zárt szabályozási rendszert mintavételezése után (10. a) ábra) megvizsgáltam a stabilitási viszonyokat (10. b) ábra). A zárt, mintavételes szabályozási rendszer a  $z$ -síkon, az egységnyi sugarú körön belül két pólussal rendelkezik:  $z_1 = 0,538$  és  $z_2 = 0,952$ . A tranziens folyamatok  $\xi = 1$  csillapítási tényezővel rendelkeznek.
- 2) Ha a jelenleg meglévő tartalékokra előírnak értékeket és szigorúbb követelményeket támasztanak, akkor előfordulhat, hogy a zárt szabályozás szabályozóját újra kell tervezni.
- 3) összehasonlítva a folytonos, és a mintavételezett zárt rendszerek viselkedését, azt állapíthatjuk meg, hogy úgy az orsózó szögsebesség (10. c) ábra), mint az orsózó szög (10. e) ábra) esetén a folytonos és a mintavételes rendszer viselkedése között csak nagyon kisértékű eltérés mérhető (10. d) és (10. f) ábrák).
- 4) Az orsózó szögsebesség esetén a hibajel stacioner értéke  $e(\infty) = -9,96889 \cdot 10^{-8} \text{ fok/s}$ , míg a dőlési szög esetén, a maradó hiba értéke állandósult állapotban  $e(\infty) = 4,92939 \cdot 10^{-19} \text{ fok}$ .
- 5) Mindkét állapotváltozó viselkedésére elmondhatjuk, hogy a mintavételezés csak nagyon kis hibát eredményezett, a maradó hiba értéke gyakorlatilag a számítások numerikus pontosságának felel meg, és maga a mintavételezés pedig érdemben nem befolyásolja.

A továbbiakban újra vizsgáljuk meg, hogy a szabályozótervezés során alkalmazott különféle súlyozó mátrixok hogyan befolyásolják a mintavételes rendszer viselkedését. A számítógépes szimuláció eredményei a 11. ábrán láthatóak.



11. ábra. A Trainer-60 UAV folytonos és mintavételes zárt szabályozási rendszereinek viselkedése.

A 11. ábrán jól látható, hogy a súlyozó mátrixok értékei nagyban befolyásolják a mintavételes zárt szabályozási rendszer viselkedését. A zárt, mintavételes rendszer működése és minőségi jellemzői, performanciáinak változása tekintetében a szabályozótervezés során alkalmazott súlyozás az, ami meghatározza a rendszer viselkedését, mintsem a mintavételezés frekvenciája.

A korábban elhangzottakat összegezve elmondhatjuk tehát, hogy:

- a kisméretű UAVk PID-szabályozó alapú robotpilótáinak mintavételezése nem változtatja sem a stabilitási viszonyokat, sem pedig a minőségi jellemzőket;

- a PID-szabályozóval működő mintavételes rendszerek, hasonlóképpen a folytonos működésű rendszerekhez, inkább érzékenyek az optimális szabályozótervezés során alkalmazott súlyozásra.

**A kérdés második, 2.2 részére vonatkozó válaszom a következő:**

A dolgozat kisméretű, alapvetően felderítési céllal alkalmazott UASk, valamint az UAVk automatikus repülésszabályozása kérdéseinek vizsgálatát tűzte ki célul. Eme léggépjárművek manőverezőképessége a rendelkezésre álló vonó-, vagy tolóerő miatt meglehetősen korlátozott, így ezen UAVk agresszív, nagy terheléses manővereket nem képesek végrehajtani.

Az elmúlt évek során főleg a műveleti területi UAV alkalmazások terén megjelentek az olyan agilis, és olyan agresszív UAV repülések, amelyek során:

- az UAV nagy pályaszögű, közel függőleges, hirtelen emelkedést hajt végre;
- az UAV hirtelen nagy pályaszögű süllyedést, meredek repülési pályán, közel függőleges zuhanást hajt végre;
- az UAV épített, városi környezetben nagy terhelési tényezővel fordulót hajt végre;
- az UAV megfelelően megtervezett 3D-s repülési pályán kismagasságú repülést hajt végre;
- mozgó felszíni pontokra történő rávezetés során az UAV kis időkéssel követi azt.

A dolgozatban bemutatott szabályozótervezési módszerek alapvetően a klasszikus automatikus repülésszabályozás feladatainak végrehajtására szolgálnak. Az 'agilis', és esetleg az 'agresszív' UAV manőverezés végrehajtása (pl. cirkáló 'lőszerek') a rendelkezésre álló nagy kormányerők és nyomatékok, valamint kellő sárkányszerkezeti szilárdság kérdése, mintsem szabályozási kérdés: az agresszív manőverekből eredő terheléseket a sárkányszerkezetnek sérülések nélkül (pl. repedés, törés) el kell viselnie. A bemutatott szabályozási algoritmusok a megfelelően tervezett UAVk agilis, és agresszív irányítására egyaránt alkalmasak.

Még egyszer nagy tisztelettel megköszönve Szabó professzor úr opponensi munkáját, tisztelettel arra kérem, hogy a kérdéseire adott válaszaimat elfogadni szíveskedjen!

Budapest, 2024. szeptember 20.



Szabolcsi Róbert