

Szabolcsi Róbert

## PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰVEK AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZEREI TÍPUS- ÉS LÉGIALKALMASSÁGI TANÚSÍTÁSÁNAK MEGFELELÉSI KRITÉRIUMAI

### Rezümé:

A szerző célja, hogy az UAV/UAS automatikus repülésszabályozó rendszerének típus és légi alkalmassági tanúsításának folyamatáról átfogó képet vázoljon, figyelembe véve úgy a hazai, mint a nemzetközi jogi és egyéb szabályozási környezetet. A cikkben a pilóta nélküli légi járművek repülési és üzemeltetési jellemzői közül a fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszerek minőségi jellemzői kapnak különös hangsúlyt. Tekintettel a szabályozások hiányosságaira, olyan javaslatokat fogalmaz meg, amelyek teljesen újnak számítanak a kisméretű UAV típus, és légialkalmassági tanúsításának folyamatában úgy a hazai, mint a nemzetközi gyakorlatban is.

### Kulcsszavak:

UAV; UAS; típus- és légi alkalmasság; robotpilóta; automatikus repülésszabályozás; földi- és légi üzemeltetési jellemzők.

Szabolcsi, Róbert

## CRITERIA OF THE COMPLIANCE OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLES AUTOMATIC FLIGHT CONTROL SYSTEM TO TYPE- AND AIRWORTHINESS CERTIFICATION

### Abstract:

The purpose of the author is to highlight some interesting aspects of the procedure of the type worthiness-, and airworthiness certification of the automatic flight control system of the UAV/UAS systems regarding both domestic and international relevant regulations of this topic. From those existing flying and handling qualities defined for manned aircraft author had established a new system of the dynamic performances of the automatic flight control systems to be evaluated for measure of the compliance of the UAV flight control system. Due to lack of regulations in the category of the small UAVs author will formulate a brand-new system of the dynamic performances to evaluate measure of compliance of the UAV to type- and airworthiness requirements. Results of this work could be considered by rulemakers of the authorities both in Hungary, and abroad, too.

### Keywords:

UAV; UAS; type- and airworthiness; autopilot; automatic flight control systems; flying and handling qualities.

A pilóta nélküli légijármű-rendszerek (Unmanned Aerial System – UAS) típus- és légi alkalmassági tanúsításának jogszabályi környezete meglehetősen összetett, több évtizede alakuló, és folyamatosan fejlődő szabályrendszer. A jogszabályi környezet megfelelő kialakításában jellemzően azok az országok járnak élen, amelyek a tervezésben és a gyártásban is, és amelyeknek a termékei nagy számmal vesznek részt úgy az állami célú, mint a polgári repülésben.

A fejlett szabályozással bíró országokról elmondható, hogy alapvetően nemzeti, számos esetben azonban nemzetközi (EU, NATO) szabályozót is alkotnak. E szabályrendszerek kiforrottak, a gyakorlatban bizonyították szükségszerűségüket és

alkalmazhatóságukat. A nemzetközi szabályozás egyik kulcseleme, egyben közös jellemzője is az említett repülőeszközök (UAV/UAS) számára megfelelő szintű repülésbiztonságot garantáló normarendszer.

Hazai viszonylatban meglehetősen nagy az elmaradás e témakörben. Számos területen, például a pilóta nélküli légi jármű (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) típus- és légi alkalmassági tanúsítási folyamatára nem is létezik szabályozás. A jelenleg meglévő szabályok csak az állami célú légiközlekedésben résztvevő olyan légi járművekre vonatkoznak, amelyeket személyzet irányít a fedélzetről.

Tekintettel a hiányos szabályozásra, a jelen tanulmányban bemutatunk és alkalmazásra javasolunk egy merőben új követelményrendszert, amely alkalmas lehet a kisméretű pilóta nélküli légi járművek (Small Unmanned Aerial Vehicle – SUAV) fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszer típus-, és légialkalmassági megfelelési vizsgálata során.

### **Előzmények, motiváció, problémafelvetés**

Egy korábbi cikkemben azt a kérdéskört feszegettem, hogy a hatósági tanúsítás eljárási folyamatai „barát, vagy ellenség”-ként kezelhetőek-e? [1] A cikkben igazoltam, hogy a hatósági eljárásnak gyakorlatilag nincs hátránya, miközben számos előnye is mutatkozik.

Másik írásomban az UAV/UAS rendszerek légi alkalmassági tanúsítási sajátosságaival foglalkoztam. [2] Ebben bemutattam, hogy a hazai tanúsítási rendszer számos eleme egyelőre nem teljes részletességgel kidolgozott, számos terület vár még szabályozásra vagy éppen a meglévő szabályok módosítására. A cikk fontos eredménye a tengerentúli (Amerikai Egyesült Államok, Ausztrália), és az európai (EASA) szabályozási rendszerek elemzése, amely bemutatja, hogy a fejlett országok hogyan közelítik meg az UAV típus- és légi alkalmasság tanúsításának kérdéskörét.

Egy további tanulmányomban a hazai fejlesztésű METEOR–3MA, és a részére kifejlesztett C4S–HMEI OSD fedélzeti robotpilóta típus- és légialkalmassági tanúsításának eredményeit, és tapasztalatait mutattam be. [3] A Nemzeti Közlekedési Hatóság Légügyi Hivatala által vezetett hatósági tanúsítási folyamatban, amely ez év során sikerrel kecsegtet, független szakértőként vettem, és veszek részt mind a mai napig.

A modern automatikus repülésszabályozó rendszereket bemutató könyvemben részletesen foglalkozom a légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei minőségi jellemzőivel. [4] A könyv rámutat, hogy a jelenleg ismert minőségi jellemzőket alapvetően az utasok, vagy a személyzet komfortérzetét szem előtt tartva határozták meg, így azok UAV típus- és légi alkalmassági tanúsítására közvetlenül nem alkalmazhatóak.

Az UAV- és UAS-rendszerek történetét, hazai és nemzetközi alkalmazási lehetőségeit, a földi- és légi üzemeltetéssel kapcsolatos jogi kérdéseket, valamint az üzemeltetést alapvetően meghatározó emberi tényezők kérdéskörét mutatja be a Palik Mátyás által szerkesztett könyv. [15] Az anyag számos fejezete hiánypótló, eredményei gazdagítják az UAV/UAS tervezésével, fejlesztésével és gyártásával foglalkozó tudományokat.

Megemlíteni szükséges, hogy az Európai Bizottság által az Európai Parlamentnek és az Európai Tanácsnak készített és megküldött 2014. április 8-ai közleménye (Új

korszak a légi közlekedésben – A légiközlekedési piac megnyitása a távirányított légi jármű-rendszerek biztonságos és fenntartható polgári alkalmazása előtt) az UAV és Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) rendszerek légtérbe integrálását fokozatosan, és 2016-tól kezdődően javasolta. [16]

A nemzetközi gyakorlatban rendelkezésre álló szabályozók közül a NATO STANAG 4671 katonai szabvány az egyedüli, amely pilóta nélküli légi jármű rendszer légi alkalmassági tanúsításával foglalkozik. [7] A szabvány hatálya a több mint 150 kg és legfeljebb 20 000 kg maximális felszálló tömegű, és nem elkülönített légtérben közlekedő UAV-okra terjed ki, így tehát e joganyag nem alkalmazható a kisméretű UAV-kra.

Mindezekon túl, az UAV repülésszabályozása szempontjából fontos dinamikus minőségi jellemzőket a szabvány *Flight Characteristics/Controllability and Manoeuvrability* című fejezetének a *145 Longitudinal control* és a *147 Directional and lateral control* alfejezetei „Not applicable” („Nem alkalmazandó”) megjegyzéssel jelölik. Más szóval: a vizuális látótávolságon túl repülő pilóta nélküli légi járművek, amelyek nem elkülönített légtérben repülnek, sokszor automatizált üzemmódokon, a NATO STANAG 4671 szabvány hatálya szerint nem rendelkeznek a zárt automatikus repülésszabályozó rendszerekre vonatkozó minőségi előírásokkal.

Egyrészt érthető a szabályalkotók hozzáállása, mert előírások hiányában a rendszerek hatósági tanúsítása általános minőségi, irányíthatósági, és kormányozhatósági feltételek mellett lényegesen egyszerűbb. Másrészt azonban, tekintettel az UAV legalább 150 kg-os maximális felszálló tömegére, amely adott esetben (például az UAV feletti irányítás elvesztése) mint „légi bomba” közlekedik a nem elkülönített légtérben. Könnyű belátni, hogy szükség van egy olyan minőségi követelményrendszerre, amely – egyéb más irányítástechnikai jellemzők mellett – biztosítja az UAV-repülések során a repülésbiztonság megfelelő szintjét.

A jelen tanulmányban e követelményrendszer azonosítását végzem el, komplex módon közelítve a problémát. Meghatározom az egyes UAV irányítási csatornákat, és az irányítási csatornák minőségi jellemzőinek körét. A cikk eredményei, remélhetőleg, jól használhatók majd az UAV/UAS rendszerek koncepcionális, illetve előzetes tervezése során is.

## **A HAZAI ÉS A NEMZETKÖZI SZABÁLYOZÁSI KÖRNYEZET BEMUTATÁSA**

Az állami célú repülésben használt légi járművek típus-, és légi alkalmassági követelményeit a 21/1998. (XII. 21.) HM rendelet taglalja. [5] E jogszabály még az UAV, vagy az UAS kifejezést sem tartalmazza. Megemlíteni szükséges azonban, hogy a rendelet inkább a légi alkalmassági tanúsítás rendjét, mint az eljárás módszertanát, vagy éppen műszaki előírásait, követelményeit adja meg.

A 2004-ben kiadott *MIL HDBK-516A Airworthiness Certification Criteria, Department of Defense Handbook* a típus-, és légi alkalmassági tanúsítás folyamatát leíró olyan joganyag, amely nem tesz különbséget az ember által a fedélzetről vezetett, vagy a földről irányított UAV között. [6] E joganyag hazai bevezetésére mindeddig nem került sor.

A NATO STANAG 4671 szabvány kifejezetten az állami célú repülés, katonai alkalmazású UAS-rendszerek tervezési-, gyártási-, valamint légi alkalmassági tanúsítási követelményeiről szól. [7] A szabvány 1. változata 2007-ben készült el. Azt

a NATO-tagországokban 2008-ban ratifikálták. Végül a NATO STANAG 4671 szabvány 3. változatát 2009-ben léptette hatályba a NATO, azonban hazánk ezt a szabványt nem vezette be a hazai jogrendbe.

A hagyományos katonai légi járművekkel szemben támasztott követelmények szabványai több évtizedes múlttra tekintenek vissza:

- 1) helikopterek repülési jellemzőinek szabványa 1961-ben jelent meg; [11]
- 2) a függőleges és/vagy rövid fel- és leszállásra alkalmas repülőgépek (Vertical and/or Short Take-Off and Landing – V/STOL) légijárművek repülési jellemzőit, paramétereit a vonatkozó szabvány foglalja össze; [12]
- 3) az automatikus repülésszabályozó rendszer tervezésével több forrás is foglalkozik; [10] [11]
- 4) a klasszikusnak számító MIL–F–8785C szabványt [9], a MIL–STD–1797A kézikönyv váltotta fel [9].

A [8, 9, 10, 11, 12, 13] katonai szabványok pilóta által vezetett légijárművek repülésszabályozásával, irányíthatósági-, és kormányozhatósági kritériumaival foglalkoznak.

Egy példán keresztül vizsgáljuk meg, hogy mit is jelentene, ha a meglévő szabványokat változtatás nélkül, teljes mértékben vennénk figyelembe UAV automatikus repülésszabályozási feladatainak megoldására. A [8] kézikönyvből, és a [9] szabványból ragadjunk ki egy minőségi jellemzőt. Mint azt látni fogjuk nem csak az általunk vizsgált, hanem a minőségi jellemzők széles körére jellemzőek a következő megállapításaink.

A III. osztályba<sup>1</sup> (Class III) sorolt légi járművek oldalirányú irányítási csatornájában a 30<sup>0</sup> dőlési szög eléréséhez szükséges időt az alábbiak szerint adják meg: [8] [9]

<b>A minőségi jellemzők szintje</b>	<b>Sebességi tartomány</b>	<b>„A” repülési feladat<sup>2</sup></b>	<b>„B” repülési feladat<sup>3</sup></b>	<b>„C” repülési feladat<sup>4</sup></b>
1. szint <sup>5</sup>	Alacsony	1,8	2,3	2,5
	Közepes	1,5	2,0	2,5
	Magas	2,0	2,3	2,5
2. szint <sup>6</sup>	Alacsony	2,4	3,9	4,0
	Közepes	2,0	3,3	4,0
	Magas	2,5	3,9	4,0
3. szint <sup>7</sup>	Minden	3,0	5,0	6,0

<sup>1</sup> Class III: Nagy felszálló tömegű, kis-, vagy közepes manőverező képességű légijárművek (Nehéz szállító/tanker; nehézbombázó; korai figyelmeztető repülőgépek/elektronikai hadviselést folytató légijármű/légi harcálláspont/légi vezetési pont)

<sup>2</sup> Légiharc/földi célok támadása/rakétaindítás/légi fényképezés/felderítés/légi utántöltés – fogadó légijármű/terepkövetés/tengeralattjáró felderítés/zárt kötelékes repülés

<sup>3</sup> Emelkedés/utazórepülés/körözés/ légi utántöltés –

tanker/süllyedés/vészsüllyedés/vészlassítás/légiszállítás

<sup>4</sup> Felszállás/katapult felszállás/megközelítés/átstartolás/leszállás.

<sup>5</sup> A repülési jellemzők teljesen megfelelnek a repülés feladatnak.

<sup>6</sup> A repülési jellemzők megfelelnek a repülési feladatnak.

<sup>7</sup> A légijármű biztonságosan irányítható, de a repülési jellemzők olyan mértékben megváltoznak, hogy a hajózó állomány fizikai leterheltsége lényeges mértékben megnövekszik.

	tartomány			
--	-----------	--	--	--

### 1. táblázat

A 30° dőlési szög eléréséhez szükséges idő [sec]

A minőségi jellemzők 1. szintjén, nagy repülési sebességeken, „A” repülési feladatok végrehajtása során 2,0 sec a dőlési szög beállási idejére megállapított követelmény. Nyilvánvaló, hogy UAV/UAS rendszerek esetében a dőlési szög tranziens folyamataiban ilyen szigorú feltételt támasztani értelmetlen, hiszen ha a manőver nem jelent extrém sárkányszerkezeti terhelést, akkor a tranziens folyamatok minőségi jellemzői kevésbé relevánsak.

Meg kell említeni, hogy az UAV-ok egy speciális csoportja: a légi célként használt UAV-ok számára eleve nincs is különösebb értelme szigorú szabályozástechnikai követelményt megfogalmazni, hiszen a sikeres bevetés végén a légi cél megsemmisül: a fedélzetre tehát csak olyan eszközöket szabad beépíteni, amelyek nem teszik túlságosan költségessé az UAV/UAS rendszer üzemeltetését.

Megállapíthatjuk tehát, hogy bár a NATO STANAG 4671 szabvány nem hatályos jogforrás Magyarországon, mindazonáltal, mivel a hazánkban jelenleg fejlesztett UAV-ok egyike sem éri el a legalább 150 kg maximális felszálló tömeget, egyébként sem lehetne azt alkalmazni az UAV-okra.

Úgy a hazai, mint a nemzetközi UAV-fejlesztési gyakorlat azt támasztja alá, hogy a tervezők egyre kevésbé alkalmazzák a hagyományos sárkányszerkezeti megoldásokat és elrendezéseket, míg az esetlegesen meglévő szabványok (például a NATO STANAG 4671 szabvány) hatálya alapvetően a hagyományos tervezésű, hagyományos elrendezésű légi járművekre vonatkozik. Ez tehát egy újabb probléma-, és kérdéskört vet fel, amelynek megválaszolása messze túlmutat e cikk tartalmi és terjedelmi korlátain, viszont nem szabad megfelelkezünk e kérdéskör rendezetlenségéről sem.

A hazai fejlesztésű UAV-ok típus-, és légi alkalmassági tanúsítási vizsgálatainak során tehát az egyik eleve eldöntendő kérdés, hogy a kifejlesztett UAV hagyományos, vagy nem hagyományos légi járművek minősül? Könnyű belátni, hogy az esetek többségében a sajátos sárkányszerkezeti megoldások miatt az UAV-ok nem hagyományos építésűek. Így már a fejlesztésük során célszerű a tanúsító szervezet vagy a légügyi hatóság/hivatal szakembereivel konzultálni az adott UAV típus-, és légi alkalmassági tanúsításáról, annak módszertanáról és lefolytatásáról.

## **ÚJ KÖVETELMÉNY-RENDSZER A PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰVEK FEDÉLZETI AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERE LÉGIALKALMASSÁGI TANÚSÍTÁSÁRA. A HOSSZIRÁNYÚ MOZGÁS DINAMIKUS REPÜLÉSI JELLEMZŐI**

A cikkben vizsgálatainkat a hagyományos tervezésű és hagyományos szárny-törzs-vezérsík konfigurációjú UAV-okra korlátozzuk. A tanulmányozott UAV térbeli, hosszirányú mozgásának többváltozós, állapotterres modelljét zavarásmentes esetben, az alábbi, időtartományban felírt állapot-egyenlettel írhatjuk le: [4] [14]

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

ahol:  $\mathbf{x}$  – állapotvektor,  $\mathbf{u}$  – bemeneti vektor;  $\mathbf{A}$  – állapotmátrix;  $\mathbf{B}$  – bemeneti mátrix.

A továbbiakban feltételezzük, hogy az  $\mathbf{x}$  állapotvektor rendezői, más szóval, a hosszirányú mozgás repülési paraméterei – az ISO 1151-1 szabvány [17] jelölésrendszerét alkalmazva – az alábbiak: [4] [14]

$u$  – hosszirányú repülési sebesség [m/s];

$w$  – függőleges repülési sebesség [m/s];

$q$  – bólintó szögsebesség [rad/s];

$\vartheta$  – bólintó szög [rad].

Az UAV bemeneti vektorának rendezői, más szóval, a kormányzás/irányításhoz használt bemeneti jellemzői legyenek az alábbiak: [4] [14]

$\delta_E$  – magassági kormány szöghelyzet-változása;

$\delta_{TH}$  – hajtómű vezérlő kar (gázkar) helyzetváltozása.

A (3.1) egyenlettel megadott többváltozós, dinamikus modell bemenetei közül az UAV-ok helyszabályozásában a gázkar helyzete, vagyis a hajtómű üzemállapota ritkán változik: egy-egy repülési fázisban állandó toló-, vagy vonóerőt állítanak elő a megfelelő értékű repülési sebesség biztosítása érdekében. A hosszirányú irányítási csatornában tehát az UAV tekinthető egy bemenettel rendelkező légi járműnek: a repülési paraméterek megváltoztatására a magassági kormányt használjuk.

Felmerül a kérdés, hogy az UAV irányítása során, a magassági kormányt kitérítve, az UAV milyen módon változtatja meg a hosszirányú mozgásának repülési paramétereit? A gyakorlatban azt figyelhetjük meg, hogy az UAV keresztengely körüli hosszirányú mozgása két mozgásfajtára: a rövidperiodikus, és a hosszúperiodikus (phugoid) pályalengés mozgásra bontható fel. Előbb a rövidperiódusú mozgás cseng le, majd ebből fejlődik ki a pályalengés, amikor a sebességvektor térbeli helyzete is változik.

Az UAV hosszirányú mozgásának dinamikus viselkedését az alábbi reprezentatív átviteli függvényekkel is megadhatjuk. Az átviteli függvény az UAV repülési paramétere és a bemeneti jellemzője Laplace-transzformáltjainak hányadosa: [4] [8] [9] [14]

$$\frac{q(s)}{\delta_E(s)} = \frac{sK_0 \left(s + \frac{1}{T_{\theta 1}}\right) \left(s + \frac{1}{T_{\theta 2}}\right) e^{-\tau_E s}}{\left(s^2 + 2\xi_{ph} \omega_{ph} s + \omega_{ph}^2\right) \left(s^2 + 2\xi_{sp} \omega_{sp} s + \omega_{sp}^2\right)}, \quad (3.2)$$

vagy

$$\frac{\vartheta(s)}{\delta_E(s)} = \frac{K_0 \left(s + \frac{1}{T_{\theta 1}}\right) \left(s + \frac{1}{T_{\theta 2}}\right) e^{-\tau_E s}}{\left(s^2 + 2\xi_{ph} \omega_{ph} s + \omega_{ph}^2\right) \left(s^2 + 2\xi_{sp} \omega_{sp} s + \omega_{sp}^2\right)}, \quad (3.3)$$

ahol

- $\delta_E(s)$  – a magassági kormány szöghelyzet változásának Laplace-transzformáltja;
- $q(s)$  – bólintó szögsebesség Laplace-transzformáltja;
- $\vartheta(s)$  – bólintó szög Laplace-transzformáltja;

- $K_0$  – az UAV erősítési tényezője;
- $s$  – Laplace-operátor (komplex frekvencia);
- $\frac{1}{T_{\theta 1}}$  – hosszúperiodikus, kisfrekvenciás mozgás zérusa;
- $\frac{1}{T_{\theta 2}}$  – rövidperiodikus, nagyfrekvenciás mozgás zérusa;
- $\omega_{ph}$  – az UAV csillapítatlan hosszúperiodikus (phugoid) lengésének sajátfrekvenciája;
- $\omega_{sp}$  – az UAV csillapítatlan rövidperiodikus lengésének sajátfrekvenciája;
- $\xi_{ph}$  – az UAV csillapítatlan hosszúperiodikus (phugoid) lengésének csillapítási tényezője;
- $\xi_{sp}$  – az UAV csillapítatlan rövidperiodikus lengésének csillapítási tényezője;
- $T_E$  – holtidő.

A (3.2) és a (3.3) átviteli függvények alapján könnyen belátható, hogy a dinamikus rendszer modellje negyedrendű, holtidős dinamikus rendszer. A lehetséges bemeneti jelektől függetlenül, az UAV válaszele lengő lesz, tekintettel a gyakori gyenge öncsillapításokra. Ellentétben a személyzet által a fedélzetről irányított légi járművekkel, ahol a phugoid pályalengésekkel nem számolnak, mert annak kialakulását a csillapító automata megelőzi; az UAV-ok esetén – véleményem szerint – e mozgásfajttával számolni kell a repülésszabályozás által esetlegesen nem kezelt folyamatok miatt.

Ha az UAV repülési paramétereit automatikus repülésszabályozó rendszer stabilizálja, vagy változtatja előre megadott algoritmus szerint, akkor a zárt repülésszabályozó rendszer minőségi jellemzőire megfogalmazhatunk elvárásokat, amelyeket a zárt repülésszabályozó rendszernek teljesítenie kell. Ebben az esetben csak az UAV rövidperiódusú mozgásának holtidős modelljét vesszük figyelembe, melynek átviteli függvényei az alábbiak: [4] [8] [9] [14]

$$\frac{q(s)}{\delta_E(s)} = \frac{sK_0 \left( s + \frac{1}{T_{\theta 2}} \right) e^{-T_E s}}{(s^2 + 2\xi_{sp} \omega_{sp} s + \omega_{sp}^2)} \quad (3.4)$$

vagy

$$\frac{\vartheta(s)}{\delta_E(s)} = \frac{K_0 \left( s + \frac{1}{T_{\theta 2}} \right) e^{-T_E s}}{(s^2 + 2\xi_{sp} \omega_{sp} s + \omega_{sp}^2)}. \quad (3.5)$$

A (3.2)–(3.5) modellek rögzítése lényeges, mert az UAV identifikációja során meg kell adnunk, hogy egyváltozós (átviteli függvény), vagy többváltozós (állapotterés modell) modellben gondolkodunk, az lineáris vagy nemlineáris, tartalmaz-e holtidőt az identifikálandó modell vagy sem?

A hosszirányú mozgást irányító zárt automatikus repülésszabályozó rendszer tranziens válaszfüggvényein számos minőségi jellemzőt definiálhatunk. Általában többhurkú repülésszabályozó rendszert építenek az UAV-ok fedélzetére. Az első visszacsatolás a bólintó szögsebesség szerint valósul meg, és ezt a hurkot bólintó csillapító automatának szokás nevezni. [4] [14]

A (3.4) és a (3.5) dinamikus modelleket, valamint a modellek segítségével származtatható szabályozástechnikai minőségi jellemzőket az UAV-ok automatikus repülésszabályozásában eddig még nem alkalmazták. A korábban is hivatkozott NATO STANAG 4671 katonai szabvány 145. és 147. fejezetei a „*Nem alkalmazandó*” („Not applicable”) megjelöléssel „átlépnek” e kérdéskör vizsgálatán. Könnyen belátható tehát, hogy az általam javasolt minőségi jellemzők első alkalommal kerülnek közlésre.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor a hosszirányú mozgás átmeneti függvényein értelmezett, és figyelembe veendő minőségi jellemzőkre tett javaslatom a következő:

- $\omega_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek sajátfrekvenciája;
- $\xi_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek csillapítási tényezője;
- $\sigma_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek túlszabályozása;
- $t_{cl-c}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének csúcsideje;
- $t_{cl-ss}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének tranziens ideje;
- $\Delta$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer tranziens folyamatainak dinamikus pontossága.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor tervezési kritérium lehet a zárt repülésszabályozó rendszer pólusainak és zérusainak értéke, illetve helye a komplex síkon. E minőségi előírások szolgálnak alapul domináns póluspárra történő tervezés során is: [4] [14]

- $p_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer pólusai;
- $z_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer zérusai.

Az UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor a hosszirányú mozgás felnyitott szabályozási körének frekvenciafüggvényein (Bode-diagram, Nyquist-diagram) értelmezett, és figyelembe veendő minőségi jellemzőkre javaslatom a következő:

- $G_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének erősítési tartaléka;
- $\varphi_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének fázistartaléka.

A fent megadott minőségi jellemzők elégségesek a zárt szabályozási rendszerek tervezéséhez, a megtervezett rendszer stabilitás-, és minőségvizsgálatához. A hatósági tanúsítások során a fenti paraméterek és jellemzők elegendőek az UAV repülésszabályozó rendszer előírásoknak megfelelése megítéléséhez.

**ÚJ KÖVETELMÉNYRENDSZER A PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰVEK  
FEDÉLZETI AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERE  
LÉGIALKALMASSÁGI TANÚSÍTÁSÁRA.  
AZ OLDALIRÁNYÚ MOZGÁS DINAMIKUS REPÜLÉSI JELLEMZŐI**



A légi járművek – így az UAV-ok is – az oldalirányú irányítási csatornában két repülési paraméter szerint irányítottak. Az egyik irányítási csatorna – klasszikus sárkányszerkezeti elrendezések esetén –

a „csűrőlap kitérés – orsózó szögsebesség”.

A másik irányítási csatorna

az „oldalkormány kitérés – legyező szögsebesség”.

Tekintettel arra, hogy a modern repülésmechanika külön-külön tárgyalja eme irányítási csatornákat, célszerű követni e gondolkodást.

A UAV térbeli, oldalirányú mozgásának többváltozós, állapotteres modelljét zavarásmentes esetben – az ISO 1151–1 szabvány [17] jelölésrendszerét alkalmazva – az alábbi egyenlettel írjuk le: [4] [14]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} , \quad (4.1)$$

ahol

$\mathbf{x}$  – állapotvektor,

$\mathbf{u}$  – bemeneti vektor;

$\mathbf{A}$  – állapotmátrix;

$\mathbf{B}$  – bemeneti mátrix.

Feltételezzük, hogy az oldalirányú mozgás repülési paraméterei az alábbiak: [4] [14]

$v$  / **vagy**  $\beta$  – keresztirányú repülési sebesség/vagy csúszási szög [m/s]/vagy [rad];

$p$  – orsózó szögsebesség [rad/s];

$r$  – legyező szögsebesség [rad/s];

$\phi$  – dőlési szög [rad];

$\psi$  – irányyszög (legyező szög) [rad].

Az UAV bemeneti vektorának rendezői legyenek az alábbiak: [4] [14]

$\delta_A$  – a csűrőlapok szöghelyzet-változása;

$\delta_R$  – az oldalkormány szöghelyzet-változása.

A repülésmechanikában és az automatikus repülésszabályozás elméletében kiemelt helyet foglalnak el a reprezentatív átviteli függvények is, amelyek alkalmasak lehetnek az UAV légi üzemeltetése jellemzőinek meghatározására.

### **UAV oldalirányú mozgás dinamikus repülési jellemzői**

#### **– a hossz tengely körüli forgás dinamikus repülési jellemzői**

Az UAV hossz tengely körüli orsózó forgómozgásának dinamikus viselkedését az alábbi reprezentatív átviteli függvényekkel adhatjuk meg: [4] [8] [9] [14]

$$\frac{p(s)}{\delta_A(s)} = \frac{sK_\phi (s^2 + 2\xi_\phi \omega_\phi s + \omega_\phi^2) e^{-\tau_A s}}{(s + 1/T_s)(s + 1/T_r)(s^2 + 2\xi_{ph} \omega_{ph} s + \omega_{ph}^2)}, \quad (4.2)$$

vagy

$$\frac{\phi(s)}{\delta_A(s)} = \frac{K_\phi (s^2 + 2\xi_\phi \omega_\phi s + \omega_\phi^2) e^{-\tau_A s}}{(s + 1/T_s)(s + 1/T_r)(s^2 + 2\xi_D \omega_D s + \omega_D^2)}, \quad (4.3)$$

ahol

- $\delta_A(s)$  – a csűrőlapok szöghelyzet változása;
- $p(s)$  – orsózó szögsebesség Laplace-transzformáltja;
- $\phi$  – dőlési (bedöntési) szög Laplace-transzformáltja;
- $K_\phi$  – az UAV erősítési tényezője;
- $s$  – Laplace-operátor (komplex frekvencia);
- $\frac{1}{T_s}$  – a spirálmozgás zérusa;
- $\frac{1}{T_r}$  – az orsózó forgómozgás zérusa;
- $\omega_D$  – az UAV Dutch Roll (Holland orsó) lengésének sajátfrekvenciája;
- $\omega_\phi$  – az UAV komplex zérusának sajátfrekvenciája;
- $\xi_D$  – az UAV Dutch Roll (Holland orsó) lengésének csillapítási tényezője;
- $\xi_\phi$  – az UAV komplex zérusának csillapítási tényezője;
- $\tau_A$  – holtidő.

Az UAV bedöntése esetén, az oldalirányú orsózó mozgás során a legyező szög (vagy oldalirányú lineáris mozgás sebessége) is változik, melyet az alábbi átviteli függvény definiálhatunk: [4] [8] [9] [14]

$$\frac{\beta(s)}{\delta_A(s)} = \frac{K_\beta (s + 1/T_{\beta_1})(s + 1/T_{\beta_2})(s + 1/T_{\beta_3}) e^{-\tau_A s}}{(s + 1/T_s)(s + 1/T_r)(s^2 + 2\xi_D \omega_D s + \omega_D^2)}, \quad (4.4)$$

ahol:

- $\beta(s)$  – a legyező szög változása [rad];
- $\frac{1}{T_{\beta_1}}$  – az oldalirányú lineáris mozgás zérusa;
- $\frac{1}{T_{\beta_2}}$  – az oldalirányú lineáris mozgás zérusa;
- $\frac{1}{T_{\beta_3}}$  – az oldalirányú lineáris mozgás zérusa.

Az oldalirányú mozgást irányító zárt automatikus repülésszabályozó rendszer transziens válaszfüggvényein számos minőségi jellemzőt definiálhatunk. Általában többhurkú repülésszabályozó rendszert építenek az UAV-ok fedélzetére. Az első

visszacsatolás az orsózó szögsebesség szerint valósul meg, és ezt a hurkot dőlési csillapító automatának nevezzük.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor az orsózó mozgás átmeneti függvényé értelmezett, és figyelembe vehető minőségi jellemzőkre javaslatom a következő:

- $\omega_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek sajátfrekvenciája;
- $\xi_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek csillapítási tényezője;
- $\sigma_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek túlszabályozása;
- $t_{cl-c}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének csúcsideje;
- $t_{cl-ss}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének tranziens ideje;
- $\Delta$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer tranziens folyamatainak dinamikus pontossága.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor tervezési kritérium lehet még a zárt automatikus repülésszabályozó rendszer pólusainak és zérusainak értéke, és helye a komplex síkon. E minőségi előírások szolgálnak alapul domináns póluspárra történő tervezés során is: [4] [14]

- $p_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer pólusai;
- $z_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer zérusai.

Az UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor az oldalirányú mozgás felnyitott szabályozási körének frekvenciafüggvényein (Bode-diagram, Nyquist-diagram) értelmezett, és figyelembe veendő minőségi jellemzőkre javaslatom a következő:

- $G_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének erősítési tartaléka;
- $\varphi_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének fázistartaléka.

A fent megadott minőségi jellemzők elégségesek a zárt szabályozási rendszerek tervezéséhez, a megtervezett rendszere stabilitás-, és minőségvizsgálatához. A hatósági tanúsítások során a fenti paraméterek és jellemzők elegendőek az UAV repülésszabályozó rendszer előírásoknak megfelelése megítéléséhez. Meg kell említeni, hogy az egyes minőségi jellemzők definiálása után e paraméterek elfogadható számértékeit is meg kell adnunk. A hatósági vizsgálatok során az UAV megfelelést egy létező kritérium-rendszerhez viszonyítják.

### **UAV oldalirányú mozgás dinamikus repülési jellemzői**

#### **– a függőleges tengely körüli forgás dinamikus repülési jellemzői**

Az UAV függőleges tengely körüli legyező mozgásának dinamikus viselkedését az alábbi reprezentatív átviteli függvényekkel adhatjuk meg: [4] [8] [9] [14]

$$\frac{\beta(s)}{\delta_R(s)} = \frac{K_B \left(s + \frac{1}{T_{\beta_1}}\right) \left(s + \frac{1}{T_{\beta_2}}\right) \left(s + \frac{1}{T_{\beta_3}}\right) e^{-\tau_R s}}{\left(s + \frac{1}{T_s}\right) \left(s + \frac{1}{T_r}\right) (s^2 + 2\xi_D \omega_D s + \omega_D^2)} \quad (4.5)$$

vagy egyszerűbb alakban

$$\frac{\beta(s)}{\delta_R(s)} = \frac{K_B e^{-\tau_R s}}{s^2 + 2\xi_D \omega_D s + \omega_D^2}, \quad (4.6)$$

ahol

$\delta_R(s)$  – az oldalkormány szöghelyzet változása.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor a legyező mozgás átmeneti függvényén értelmezett, és figyelembe vehető minőségi jellemzőkre javaslatom a következő:

- $\omega_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek sajátfrekvenciája;
- $\xi_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek csillapítási tényezője;
- $\sigma_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek túlszabályozása;
- $t_{cl-c}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének csúcsideje;
- $t_{cl-ss}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének tranziens ideje;
- $\Delta$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer tranziens folyamatainak dinamikus pontossága.

A zárt UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor tervezési kritérium lehet még a zárt automatikus repülésszabályozó rendszer pólusainak és zérusainak értéke és helye a komplex síkon: [4] [14]

- $p_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer pólusai;
- $z_i$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer zérusai.

Az UAV repülésszabályozó rendszerek tervezésekor az oldalirányú mozgás felnyitott szabályozási körének frekvenciafüggvényein (Bode-diagram, Nyquist-diagram) értelmezett, és figyelembe veendő minőségi jellemzőkre javaslatom a következő:

- $G_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének erősítési tartaléka;
- $\varphi_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszerének fázistartaléka.

A fent megadott minőségi jellemzők elégségesek az UAV zárt szabályozási rendszerei tervezéséhez, a megtervezett rendszer stabilitás-, és minőségvizsgálatához. A javasolt minőségi jellemzők közül sokszor elegendő a legfontosabbakkal számolni, míg a kevésbé fontos jellemzőkkel nem számolunk.

Megválaszolásra vár az a kérdés is, hogy az előbbi fejezetekben bemutatott modelleket valóban, mint holtidős modelleket vizsgáljuk-e, esetleg a holtidőtől eltekintünk. A kérdésre minden egyes UAV-típus esetén külön-külön adhatunk hiteles választ. Ha a fedélzeti számítógépes képességek megengedik, hogy akár 10-15 dimenziós állapotterés dinamikusan modelleket is képes legyen kezelni az automatikus repülésszabályozó rendszer, akkor a holtidő modellezése akár negyed-, vagy ötödrendű Padé-approximációval is történhet, ami kellő pontossággal adja vissza a holtidő dinamikusan viselkedését. Ha a fedélzeti számítási képességek korlátozottak, akkor vagy alacsonyabb rendszámú polinommal közelítjük a holtidőt, vagy egyszerűen elhanyagoljuk azt.

### Összegzés, eredmények, következtetések

A cikkben összefoglaltam azokat a matematikai, dinamikus modelleket, amelyek segítségével az UAV térbeli mozgása explicit módon leírható. A javasolt modellek többváltozós, állapotterés modellek, vagy pedig egyváltozós, átviteli függvényekkel megadott modellek. E modellek lehetnek holtidősek vagy holtidő-mentesek. A cikk bemutatta a zárt automatikus repülésszabályozó rendszerek minőségi jellemzőit, és bemutatta azok sokszínűségét. E minőségi jellemző halmazból lehetséges összeállítani azon jellemzők körét, amely már alkalmas lehet egy adott UAV típus hatósági tanúsítása során a megfelelés értékelésére.

Az UAV típus-, és légi alkalmassági tanúsítása során célszerű a rendelkezésre álló nagyszámú minőségi jellemző közül kiválasztani azt a néhány releváns jellemzőt, amelyek jól írják le és hűen jellemzik egy-egy UAV-típus viselkedését, annak térbeli mozgása során. Könnyű belátni, hogy a későbbi megfelelésre vizsgált UAV repülésszabályozási minőségi jellemzők közül célszerű azt a minimumot megtalálni, amely elegendő a tanúsító hatóság számára, és maga az UAV/UAS nemcsak a repülésszabályozás, hanem a repülésbiztonság szempontjából is rendelkezik az előírt képességekkel.

Az UAV automatikus repülésszabályozó rendszerének tanúsítására megfontolás tárgyát képezheti a minőségi jellemzők alábbi csoportja:

- a.  $\xi_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek csillapítási tényezője;
- b.  $\sigma_{cl}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszere csillapított lengéseinek túlszabályozása;
- c.  $t_{cl-c}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének csúcsideje;
- d.  $t_{cl-ss}$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer átmeneti függvényének tranziens ideje;
- e.  $G_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszer erősítési tartaléka;
- f.  $\varphi_m$  – az UAV felnyitott automatikus repülésszabályozó rendszer fázisstartaléka;
- g.  $\Delta$  – az UAV zárt automatikus repülésszabályozó rendszer dinamikus pontossága.

E minőségi jellemzők a klasszikus szöghelyzet-stabilizáló robotpilóta-üzemmódokon alkalmasak a repülésszabályozás minőségének megítélésére. A bonyolultabb pályavezérlő repülések, összetett navigációs feladatok megoldása

során e jellemzők akár más és más értékeket is felvehetnek, esetleg a minőségi jellemzők köre is megváltozhat: kiegészülhet, vagy akár csökkenhet is a megfelelésre vizsgált paraméterek száma.

\*

A cikk szerzője tovább dolgozik e területen, és úgy a hosszirányú-, mint az oldalirányú mozgás szabályozástechnikai minőségi jellemzőire számszerűsített javaslatot is tesz, valamint számítógépes szimuláció segítségével mutatja be a megadott minőségi jellemzőkkel bíró egyes UAV viselkedési formákat.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Szabolcsi, R.: UAV és UAS rendszerek légiakalmassági tanúsítása: barát vagy ellenség?! MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, 2013. Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2013 tudományos konferencia kiadványa. Elektronikus műszaki füzetek XIII, ISBN 978-963-7064-30-2, pp 1–10.
2. Szabolcsi, R.: Pilóta nélküli légi jármű rendszerek légiakalmassági jellemzői, és a légiakalmassági tanúsítás követelményei. Szolnoki Tudományos Közlemények, XII. évf., 1. szám, ISSN 1419-256X (2060-3002), pp 64–75. 2013.
3. Szabolcsi, R.: TUAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus-, és légiakalmassági tanúsítása. Hadmérnök, 2013/4. szám, pp. 26–32.  
[http://www.hadmernok.hu/134\\_03\\_szabolcsir.pdf](http://www.hadmernok.hu/134_03_szabolcsir.pdf)
4. Szabolcsi, R.: Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2011. ISBN 978-963-7060-328, p 415.
5. Az állami légi járművek nyilvántartásáról, gyártásáról és javításáról, valamint a típus- és légiakalmasságáról szóló 21/1998. (XII. 21.) HM rendelet.
6. MIL HDBK–516A Airworthiness Certification Criteria, Department of Defense Handbook, 2004.
7. NATO STANAG 4671 Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR), NSA/0976(2009)-JAIS/4671, 2009.
8. MIL–HDBK–1797A Flying Qualities of Piloted Aircraft, U. S. Department of Defense Handbook, Notice3, 2004.
9. MIL–F–8785C Military Specification – Flying Qualities of Piloted Airplanes, Notice 2, 1996.
10. MIL–F–9490D, Notice 1, Flight Control Systems – Design, Installation, and Test of Piloted Aircraft, General Specification, U.S. Air Force, 1992.
11. MIL–C–18244A, Amendment 1, Control and Stabilization System: Automatic, Piloted Aircraft, General Specification, 1993.
12. MIL–H–8501A Helicopter Flying and Ground Qualities: General Requirements, U.S. Washington D. C., Department of Defense, 1961.
13. MIL–F–83300 Flying Qualities of Piloted VSTOL Aircraft, U.S. Washington D. C., Department of Defense, 1970.

14. McLean, D.: Automatic Flight Control Systems, Prentice-Hall International Ltd., New York-London-Troonto-Sydney-Tokyo-Singapore, 1990.
15. Pilóta nélküli repulse profiknak és amatőröknek. (Palik, M. Szerk.) Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. ISBN 978-963-08-6923-2
16. [http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com\(2014\)207\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com(2014)207_en.pdf) (Letöltés: 2014. április 25.)
17. [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=5699](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=5699) (Letöltés: 2014. április 25.)