



*Szolnoki Tudományos Közlemények XI.  
Szolnok, 2007.*

**Dr. habil. SZABOLCSI RÓBERT<sup>1</sup>**

## **LÉGKÖRI TURBULENCIA–MODELLEK ÉS AZOK ALKALMAZÁSA AZ AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÁS TERÜLETÉN**

### **REZÜMÉ**

A cikk a légköri turbulencia matematikai modellezésével, valamint e matematikai modellek gyakorlati alkalmazásával foglalkozik. A szerző célja bemutatni a légköri turbulencia sztochasztikus matematikai modelljeit, valamint extrém légköri jelenségekre megadni a légköri turbulencia sebességvektora összetevőinek idősorait. A másik fontos, megoldásra kitűzött feladat: megvizsgálni, hogy a repülőgépek stabilitásjavító rendszerei, a csillapító automaták hogyan képesek szűrni a légköri turbulencia repülési paraméterekre gyakorolt hatását.

### **I. BEVEZETÉS**

A repülés egyik fontos sajátossága, hogy a levegő, ahol a repülés lezajlik, szinte sohasem nyugodt. A 2007. év nyara azt igazolta, és bizonyította, hogy a klímaváltozás egyik fontos „velejárója” az extrém felmelegedés, az erdőtüzek, a bozóttüzek, láptüzek, és más természeti értékek pusztulása. A nappali felmelegedéseket sokszor hatalmas, a szárazföldi éghajlati övben már trópusinak mondható orkán erejű szelek, szélviharok, és esők követhetik.

Tekintettel eme sajátos változásokra, számos ország széleskörű légi előrejelző-, figyelő-, mérő-, illetve mentő-kapacitást épít ki. A fent említett feladatok megoldása során a repülés már nemhagyományosnak számít: sokszor előre nem prognosztizálható, nem látható, és nem

---

<sup>1</sup> okl. mk. alezredes, egyetemi docens, mb. igazgató

detektálható jelenségekkel kell megküzdeni a hajózó személyzetnek. Sajnos, ez néha katasztrófához is vezet.

Sok repülőgép, már a kis-, és közepes kategóriájú repülőgépek is, rendelkezik automatikus repülésszabályozó rendszerrel, ami nagyban segíti a repülőgép-vezető tevékenységét. E rendszerek alapvetően a légijármű térbeli helyzetének stabilizálására, vagy adott algoritmus szerinti megváltoztatására hivatottak.

## II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A légköri turbulencia matematikai modellezése, és a turbulencia repülésre gyakorolt hatása már rég foglalkoztatja a kutatókat. A sztochasztikus jelek és sztochasztikus dinamikus rendszerek matematikai leírásával az [1, 2] irodalmak foglalkoznak.

A légköri turbulencia repülésdinamikai modellekre gyakorolt hatását a [3, 4] irodalmak taglalják részletesen. E könyvek szerzői a dinamikus automatikus repülésszabályozó rendszerek működését a klasszikus tárgyalási módszerek (pl. Bode-módszer, Nyquist-módszer) segítségével vizsgálják. Más szóval, az automatikus repülésszabályozó rendszert egyváltozósnak tekintik, vagyis a klasszikus tárgyalási módszer elvi alapjaiból kiindulva egy bemenetű, és egy kimenetűnek tekintik a repülésszabályozó rendszert. Könnyen belátható, hogy a dinamikus rendszerek eme approximációja ma már szükségtelen, hiszen a korszerű számítógépes programok képesek a több bemenetű, és több kimenetű (többváltozós) szabályozási rendszerek szintézisére, és analízisére is.

Az [5] irodalom összefoglalja a szélökések, és a légköri turbulencia modelleket, valamint számos hatóság és kutatóintézet által identifikált és publikált turbulencia-modell paramétereit adja meg. A cikk elkészítése során e paraméterek alapvető fontosságúak.

McLean, D. könyvében – alapvetően katonai szabványokra támaszkodva – szintén számos turbulencia modellt ad meg, és közli a sztochasztikus modellek statisztikai paramétereit is [6]. McLean, D. számos repülésdinamikai sztochasztikus modellt ad meg, valamint bemutatja a többváltozós automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezését, valamint azok vizsgálatát is: részletesen taglalja a fent említett többváltozós repülésszabályozó rendszerek vizsgálatát is. E szakkönyv szintén alapvető fontosságú a cikk elkészítése szempontjából.

A sztochasztikus jelek és rendszerek számítógépes szimulációjával, valamint a dinamikus rendszerek statisztikus vizsgálatával a [7] foglalkozik, és a MATLAB<sup>®</sup> 4.0 program gyakorlati alkalmazásait mutatja be. A szerző cikkében a [8, 9] irodalmakat alkalmazza, amely a MATLAB<sup>®</sup> 6.5 verziójú programcsomag alkalmazását jelenti.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerekkel szemben támasztott üzembiztonsági, repülésbiztonsági, és minőségi követelményeket a [6, 10] források adják meg, amelyek közül a [10] irodalom összefoglaló jelleggel taglalja számos más, korábbi katonai szabvány, pl. a MIL-F-8785C szabvány követelményrendszerét.

Pokorádi, L. megadja a matematikai modellek osztályozását, amely jól alkalmazható a technikai rendszerek műszaki állapotának diagnosztikai célú vizsgálatára [11].

Végezetül, a szerző nemzetközi konferencián publikálja a légköri turbulencia függőleges összetevőjének sztochasztikus idősorát, és bemutatja azok statisztikai jellemzőit. Az idősorokat a szerző különféle időjárás feltételek mellett vizsgálta, és megállapította, hogy az időjárás feltételek nagyban befolyásolják a sztochasztikus idősorok statisztikai jellemzőit [12].

A cikkben a szerző csak az ún. kismagasságú repülések vizsgálatára korlátozza a tevékenységét, és az ún. „C” kategóriájú repülési fázisok, repülési feladatok (pl. felszállás, megközelítés, leszállás, kismagasságú terepkövetés stb.) [10].

### III. A LÉGKÖRI TURBULENCIA MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

Az automatikus repülésszabályozás elméletében és gyakorlatában a léggöri turbulencia modellezése területén széles körben alkalmazzák a sűrűség-függvény módszert [3, 4, 5, 6]. A leggyakrabban a Kármán-, vagy a Dryden-modellt szokás alkalmazni. A Kármán-féle matematikai modell pontosabb leírását adja a turbulencia regisztrátumainak, ezért a gyakorlatban szélesebb körben alkalmazzák. A Kármán-féle turbulencia modell sűrűség függvényét a következő egyenlettel lehet megadni [3, 4, 5, 6, 10]:

$$\Phi_{Kármán}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{1 + \frac{8}{3}(1,339L\Omega)^2}{(1 + 1,339L^2\Omega^2)^{11/6}}, \quad (3.1)$$

ahol  $L$  [m] a turbulencia-lépték,  $\Omega = \omega U_0^{-1}$  [rad/m] a térbeli körfrekvencia,  $\omega$  [rad/s] a megfigyelt körfrekvencia, és végezetül,  $\sigma$  [m/s] a turbulencia szórása (intenzitása).

A másik fontos matematikai modell a Dryden-féle turbulencia modell, amely egyszerűbb, viszont pontatlanabb leírását adja a léggöri turbulenciának. E modell egyszerűségénél fogva széleskörű alkalmazást nyert, és az alábbi egyenlettel definiálható [5, 6]:

$$\Phi_{Dryden}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{1 + 3L^2\Omega^2}{(1 + L^2\Omega^2)^2}. \quad (3.2)$$

Tekintettel arra, hogy e cikkben nem törekszünk a turbulencia által keltett aeroelasztikus lengések leírására, így megelégszünk az egyszerűbb Dryden-modell alkalmazásával. A [3, 4, 5, 6, 10] szakirodalmak a léggöri turbulencia test-koordináta rendszer tengelyeire vetített sebességi összetevőire az alábbi sűrűség-függvényeket adják meg:

$$\Phi_{u_g}(\Omega) = \frac{2\sigma_u^2 L_u}{\pi} \frac{1}{1 + (L_u\Omega)^2}, \quad (3.3)$$

$$\Phi_{v_g}(\Omega) = \frac{\sigma_v^2 L_v}{\pi} \frac{(1 + 3(L_v\Omega)^2)}{[1 + (L_v\Omega)^2]^2}, \quad (3.4)$$

$$\Phi_{w_g}(\Omega) = \frac{\sigma_w^2 L_w}{\pi} \frac{(1 + 3(L_w\Omega)^2)}{[1 + (L_w\Omega)^2]^2}. \quad (3.5)$$

ahol  $\sigma_i^2 = \int_0^\infty \Phi_i(\Omega) d\Omega_i \Big|_{i=u,v,w}$ . Ismeretes, hogy

$$\omega = U_0 \Omega, \quad (3.6)$$

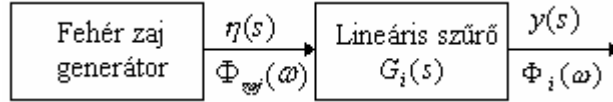
ezért a (3.3)–(3.5) egyenleteket az alábbi alakban is felírhatjuk [3, 4, 5, 6, 10]:

$$\Phi_{u_g}(\omega) = \frac{2\sigma_u^2 L_u}{U_0 \pi} \frac{1}{\{1 + (L_u/U_0)^2 \omega^2\}}, \quad (3.7)$$

$$\Phi_{v_g}(\omega) = \frac{\sigma_v^2 L_v}{U_0 \pi} \frac{(1 + 3(L_v/U_0)^2 \omega^2)}{\{(1 + (L_v/U_0)^2 \omega^2)\}^2}, \quad (3.8)$$

$$\Phi_{w_g}(\omega) = \frac{\sigma_w^2 L_w}{U_o \pi} \frac{(1 + 3(L_w / U_o)^2 \omega^2)}{\{(1 + (L_w / U_o)^2 \omega^2)\}^2}. \quad (3.9)$$

A megadott statisztikai jellemzőkkel bíró sztochasztikus jeleket úgy állíthatunk elő, ha egy előre megadott,  $G_i(s)$  átviteli függvényű, lineáris szűrő bemenetére korlátozatlan,  $\Phi_{zaj}(\omega)$  sűrűség-függvényű, ideális fehér zajt kapcsolunk. A szűrő paramétereit úgy kell megválasztani, hogy annak kimeneti jele a keresett  $\Phi_i(\omega)$  legyen, amelynek statisztikai jellemzői éppen az általunk szükségesnek vélt paraméterekkel rendelkezzen. A sztochasztikus jel létrehozásának folyamatát a 3.1. ábra szemlélteti.



3.1. ábra. Sztochasztikus jelek előállítása.

A szűrő kimeneti jelének sűrűség-függvénye az alábbi összefüggés alapján számítható [2, 3, 6]:

$$\Phi_i(\omega) = \left| G_i(s) \right|_{s=j\omega}^2 \Phi_{zaj}(\omega) = G_i(s) G_i(-s) \Big|_{s=j\omega} \Phi_{zaj}(\omega). \quad (3.10)$$

Ha a fehér zaj generátor ideálisnak mondott, vagyis sávkorlátozatlan jeleket állít elő, akkor igaz, hogy [1]:

$$\Phi_{zaj}(\omega) = 1. \quad (3.11)$$

Ebben az esetben a (3.10) egyenlet az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$\Phi_i(\omega) = \left| G_i(s) \right|_{s=j\omega}^2 \Phi_N(\omega) = G_i(s) G_i(-s) \Big|_{s=j\omega}. \quad (3.12)$$

A lineáris szűrő  $G_i(s)$  átviteli függvényének alakjaira a [6] irodalom az alábbi egyenleteket adja meg:

$$G_{u_g}(s) = \frac{\sqrt{K_u}}{s + \lambda_u}, \quad G_{v_g}(s) = \sqrt{K_v} \frac{s + \beta_v}{(s + \lambda_v)^2}, \quad G_{w_g}(s) = \sqrt{K_w} \frac{s + \beta_w}{(s + \lambda_w)^2}, \quad (3.13)$$

ahol:

$$K_u = \frac{2U_o \sigma_u^2}{L_u \pi}, \quad K_v = \frac{3U_o \sigma_v^2}{L_v \pi}, \quad K_w = \frac{3U_o \sigma_w^2}{L_w \pi}, \quad (3.14)$$

$$\beta_v = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_v}, \quad \beta_w = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_w}, \quad (3.15)$$

$$\lambda_u = \frac{U_o}{L_u}, \quad \lambda_v = \frac{U_o}{L_v}, \quad \lambda_w = \frac{U_o}{L_w}. \quad (3.16)$$

Könnyen belátható, hogy a lineáris szűrők (3.13) átviteli függvényeit behelyettesítve a (3.12) egyenletbe éppen a Dryden-féle (3.7)–(3.9) megfelelő sűrűség-függvényeket kapjuk.

A továbbiakban feltételezzük, hogy az általunk vizsgált légi jármű kismagasságú, alacsony sebességű repülést hajt végre. Legyenek a kiindulási repülési paraméterek az alábbiak:

$$H = 100 \text{ m} \cong 328,084 \text{ láb}; \quad U_o = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}^2. \quad (3.17)$$

<sup>2</sup> 1 láb  $\cong$  0,3048 m — 1 m  $\cong$  3,28084 láb. Bár e mértékegység nem tartozik az SI-rendszerhez, alkalmazása az angolszász mértékegység rendszerben széleskörű, repülésben történő alkalmazása miatt pedig megkerülhetetlen.

A (3.14)-(3.16) egyenletek alapján könnyen belátható, hogy a (3.13) átviteli függvények pontos felírásához – a (3.17) repülési paraméterek ismerete mellett – elengedhetetlenül szükséges a testkoordináta rendszer tengelyeire vett  $L_i$  turbulencia-léptékek, valamint az egyes  $\sigma_i$  turbulencia intenzitások ismerete.

A turbulencia intenzitások [5] szerint az alábbi NASA-adatokkal adhatók meg:

$$\text{✎ a repülőgép } OX \text{ hossz tengelye mentén: } 3,4 \text{ m/s} \leq \sigma_u \leq 0,85 \text{ m/s}, \quad (3.18)$$

$$\text{✎ a repülőgép } OY \text{ kereszt-tengelye mentén: } 2,8 \text{ m/s} \leq \sigma_v \leq 0,7 \text{ m/s}, \quad (3.19)$$

$$\text{✎ a repülőgép } OZ \text{ függőleges tengelye mentén: } 1,8 \text{ m/s} \leq \sigma_w \leq 0,45 \text{ m/s}. \quad (3.20)$$

McLean, D. szerint – extrém időjárási feltételek (erős vihar) esetére – igazak az alábbi turbulencia intenzitások [6, 10]:

$$\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w = 7 \text{ m/s}. \quad (3.21)$$

A kismagasságú légköri turbulencia  $L_i$  léptékeit –  $10 \text{ láb} \leq b \leq 1000 \text{ láb}$  repülési magasságok esetén – az alábbi összefüggések szerint számíthatjuk [10]:

$$L_u = 2L_v = \frac{b}{(0,177 + 0,000823 \cdot b)^{1,2}}, \quad L_w = 0,5 b. \quad (3.22)$$

McLean, D. szerint – extrém időjárási feltételek (erős vihar) esetére – igazak az alábbi turbulencia léptékek [6, 10]:

$$L_u = L_v = L_w = 580 \text{ m}. \quad (3.23)$$

A légköri turbulencia állandó összetevőjének sebességét – különféle időjárási viszonyokra a [10] katonai szabvány adja meg, grafikus alakban, az egyes sebességek előfordulásának valószínűsége függvényében. Kismagasságú turbulencia-modellek esetén igaz, hogy a turbulencia függőleges sebességi összetevőjének  $\sigma_w$  intenzitása a következő összefüggés alapján is kiszámítható [10]:

$$\sigma_w = 0,1 u_{20}, \quad (3.24)$$

ahol  $u_{20}$  a turbulencia állandó hosszirányú sebességi összetevője  $b = 20 \text{ láb}$  repülési magasságon.

A (3.17)–(3.23) összefüggések alapján a turbulencia léptékek már könnyen kiszámíthatóak, és az 1. Táblázatban találjuk őket.

1. Táblázat. A turbulencia-lépték értékei  $H = 100 \text{ m} \cong 328,084 \text{ láb}$  esetén.

Turbulencia lépték	Nominális (Nom)	Extrém (Worst Case)
$L_u$	862,185497 láb $\cong$ 262,7941311 m	580
$L_v = 0,5 L_u$	431,0927485 $\cong$ 131,3970655 m	580
$L_w$	50	580

A (3.17)–(3.24) képletek alapján a turbulencia intenzitások könnyen kiszámíthatóak, és a 2. Táblázatban foglaltuk őket össze.

2. Táblázat. A turbulencia intenzitások értékei.

Turbulencia intenzitások	Minimális (Min)	Maximális (Max)	Extrém (Worst Case)
$\sigma_u$ , [m/s]	0,85	3,4	7
$\sigma_v$ , [m/s]	0,7	2,7	7
$\sigma_w$ , [m/s]	0,45	1,8	7

A 2. Táblázat, valamint a (3.24) egyenlet alapján a légköri turbulencia állandó hosszirányú sebességi összetevője a 3. Táblázatban található.

3. Táblázat. Az  $u_{20}$  sebesség értékei.

Légköri turbulencia jellemzői	Minimális (Min)	Maximális (Max)	Extrém (Worst Case)
$\sigma_w = 0,1 u_{20}$ , [m/s]	0,45	1,8	7
$u_{20}$ , [m/s] – [km/h]	4,5 – 16,2	18 – 64,8	70 – 252

A lineáris szűrők (3.13) egyenletekkel megadott átviteli függvényeinek – a (3.17) feltételek mellett – az 1. és a 2. Táblázatokban megadott paraméterek alapján számított paramétereit a 3., 4., és az 5. Táblázatban foglaltuk össze. A számítások során a turbulencia intenzitás úgy minimális, mint maximális értékeihez a turbulencia érték nominális értékét vettük figyelembe.

3. Táblázat. A lineáris szűrők paramétereit –  $u_g(t)$  előállítás

Szűrő paraméterek	$K_u = \frac{2\sigma_u^2 U_o}{L_u \pi} [s^{-1}]$	$\lambda_u = \frac{U_o}{L_u} [s^{-1}]$
Min	0,043756496	0,095131547
Max	0,700103937	0,095131547
Extrém	1,344584864	0,043103448

4. Táblázat. A lineáris szűrők paramétereit –  $v_g(t)$  előállítás

Szűrő paraméterek	$K_v = \frac{3\sigma_v^2 U_o}{L_v \pi} [s^{-1}]$	$\beta_v = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_v} [s^{-1}]$	$\lambda_v = \frac{U_o}{L_v} [s^{-1}]$
Min	0,089027057	0,109848449	0,190263095
Max	1,324504595	0,109848449	0,190263095
Extrém	8,902705783	0,024885787	0,043103448

### 5. Táblázat. A lineáris szűrők paramétereit – $w_g(t)$ előállítás

Szűrő paraméterek	$K_w = \frac{3\sigma_w^2 U_o}{L_w \pi} [s^{-1}]$	$\beta_w = \frac{U_o}{\sqrt{3}L_w} [s^{-1}]$	$\lambda_w = \frac{U_o}{L_w} [s^{-1}]$
Min	0,096686627	0,288675134	0,5
Max	1,546986047	0,288675134	0,5
Extrém	2,016877296	0,024885787	0,043103448

A (3.13) átviteli függvények – a 3., 4., és az 5. Táblázatok adatait felhasználva – most az alábbi módon írhatók fel:

$$G_{u_g}^{Min}(s) = \frac{0,20918}{s + 0,09513}; G_{u_g}^{Max}(s) = \frac{0,83672}{s + 0,09513}, G_{u_g}^{Extr}(s) = \frac{1,15956}{s + 0,04310}, \quad (3.25)$$

$$G_{v_g}^{Min}(s) = 0,29837 \frac{s + 0,10984}{s^2 + 0,38052s + 0,03620}, G_{v_g}^{Max}(s) = 1,15087 \frac{s + 0,10984}{s^2 + 0,38052s + 0,03620}, \quad (3.26-a)$$

$$G_{v_g}^{Extr}(s) = 2,98374 \frac{s + 0,02488}{s^2 + 0,08620s + 0,00186} \quad (3.26-b)$$

$$G_{w_g}^{Min}(s) = 0,31094 \frac{s + 0,28867}{s^2 + s + 0,25}, G_{w_g}^{Max}(s) = 1,24377 \frac{s + 0,28867}{s^2 + s + 0,25} \quad (3.27-a)$$

$$G_{w_g}^{Extr}(s) = 1,42016 \frac{s + 0,02488}{s^2 + 0,08620s + 0,00185} \quad (3.27-b)$$

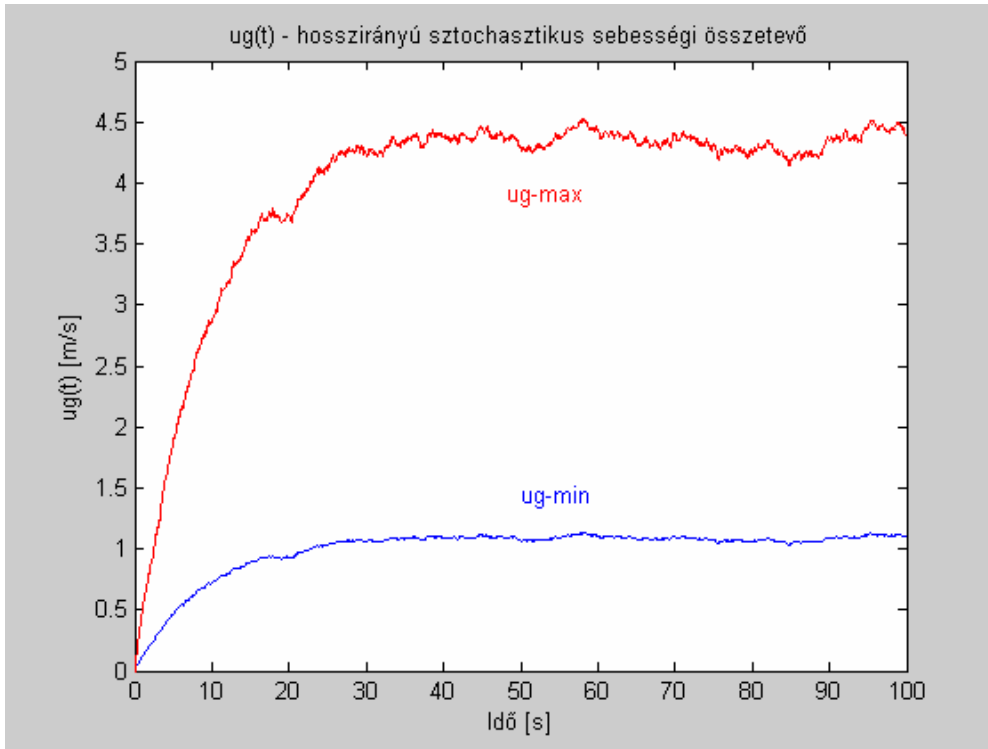
A (3.25)–(3.27) lineáris szűrők segítségével egy megadott statisztikai jellemzőkkel bíró véletlen idősorból az automatikus repülésszabályozási rendszerek analízise, és előzetes tervezése során nélkülözhetetlen idősorok már könnyen létrehozhatóak.

## IV. A LÉGKÖRI TURBULENCIA SZTOCHASZTIKUS IDŐSORAI

A 3.1. ábrán látható rendszer segítségével, támaszkodva a szűrők átviteli függvényeit megadó (3.10)–(3.16), valamint a légköri turbulencia jellemzőit definiáló (3.17)–(3.27) egyenletekre a szerző MATLAB<sup>®</sup> forráskódot készített. A számítógépes szimuláció eredményei a 4.1.–4.6. ábrákon látható [7, 8, 9].

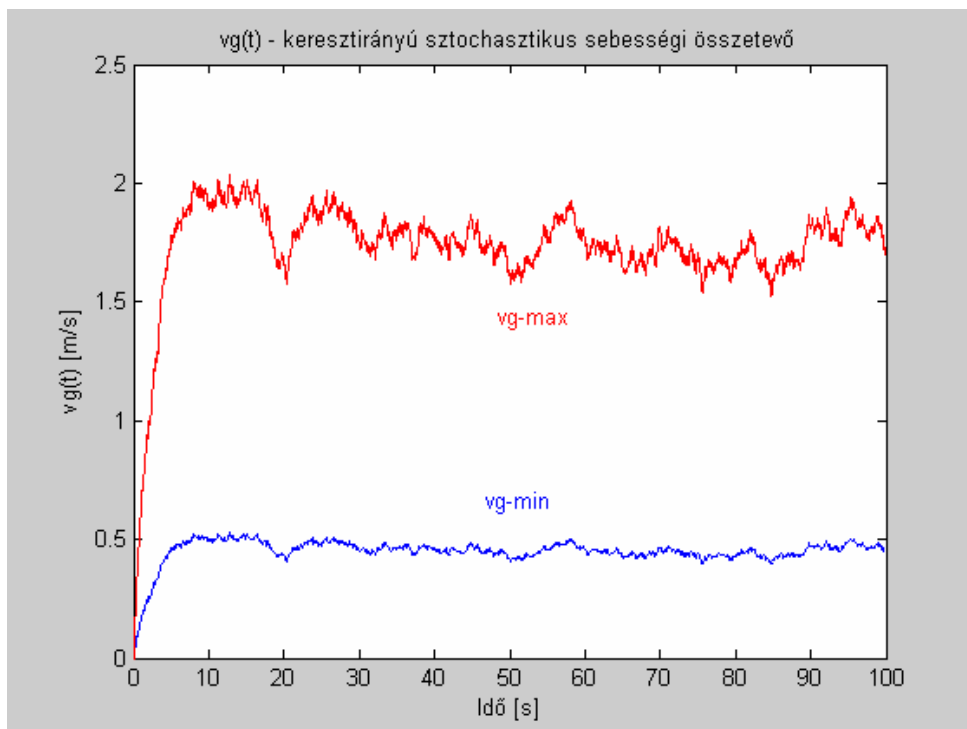
A 4.1. ábrán a légköri turbulencia hosszirányú (hátszél, vagy ellenszél) sebességi összetevőjének NASA-adatok statisztikai adatok alapján számított idősorai láthatóak.

A 4.1. ábra alapján könnyen belátható, hogy a hosszirányú sztochasztikus sebességi összetevő maximális értéke  $\approx 4,2$  m/s sebességgel változik a felfutás után. Ha a repülés ellenszélben történik, főleg kis repülési sebességek esetén ez a sebesség akár a repülőgép sebességének kritikus értékű csökkenését, végső esetben, akár az átesését is eredményezheti, ami akár a repülőgép lezuhanásához, és elvesztéséhez is vezethet.



4.1. ábra. A légköri turbulencia hosszirányú sebességi összetevője.

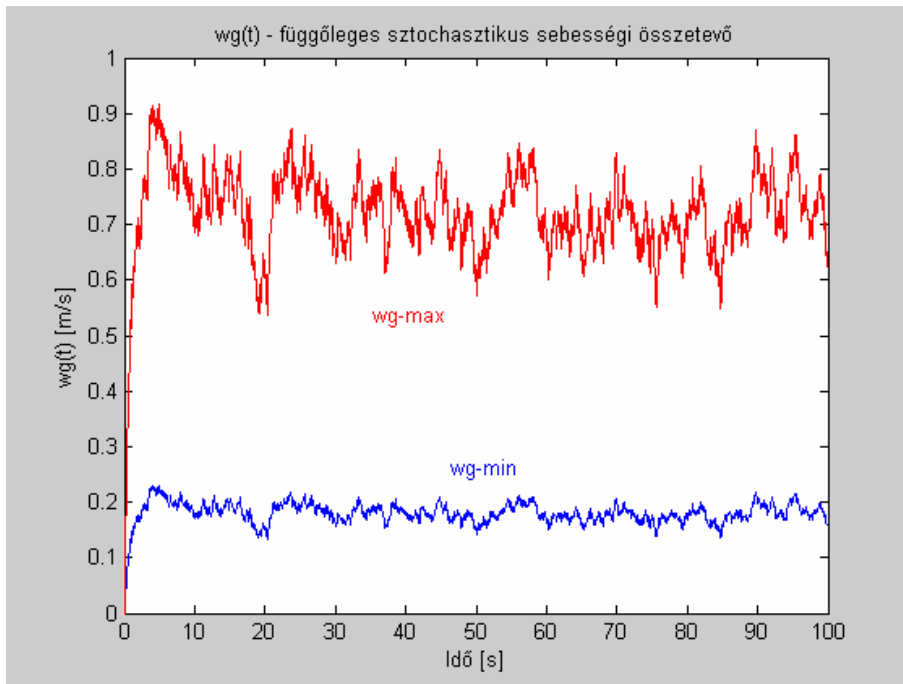
A 4.2. ábrán a légköri turbulencia keresztirányú sebességi összetevőjének időszora látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a maximális sebességi érték esetén a keresztirányú sebesség a felfutás után  $\approx 1,7$  m/s sebességgel változik. Ez azt jelenti, hogy a repülőgép gyorsan eltér a megadott repülési iránytól, ami – számos repülési feladat végrehajtása során – nem megengedett.



4.2. ábra. A légköri turbulencia keresztirányú sebességi összetevője.



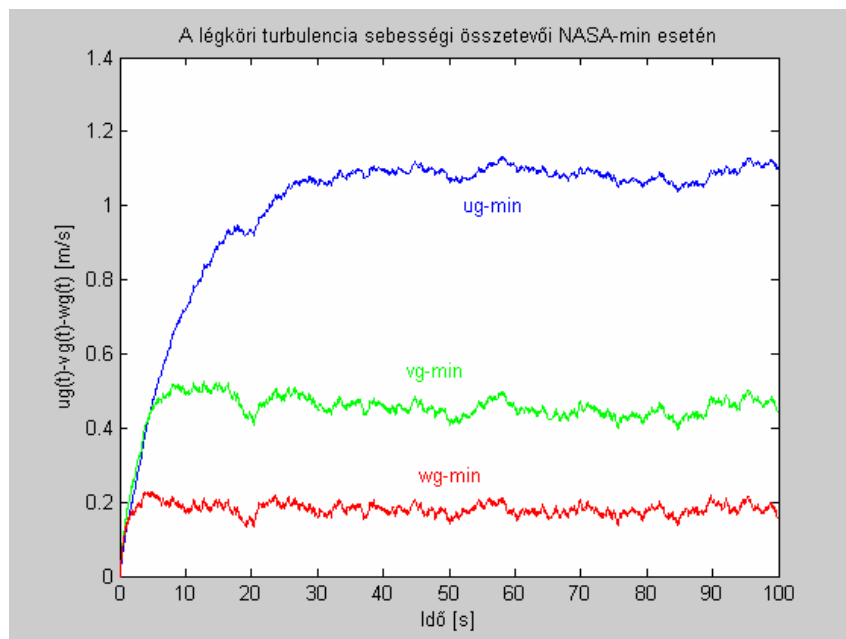
A 4.3. ábrán a léggöri turbulencia függőleges sebességi összetevőjének időszora látható.



4.3. ábra. A léggöri turbulencia függőleges sebességi összetevője.

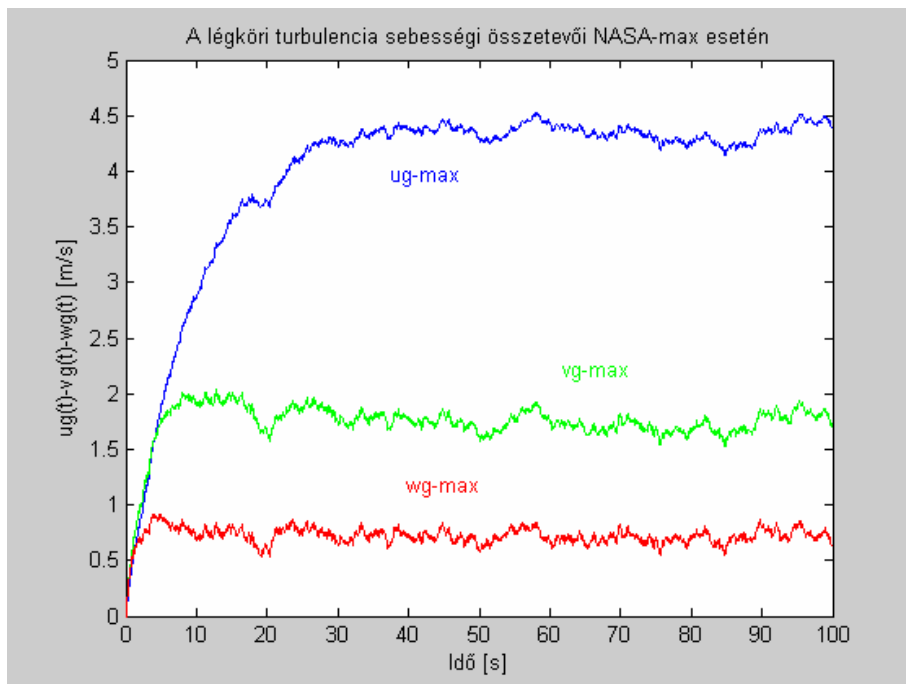
A 4.3. ábrán jól látható, hogy a léggöri turbulencia statisztikai jellemzőinek maximális értékei esetén a függőleges sebesség  $\approx 0,7$  m/s értékkel változik. Könnyen belátható, hogy már 10 sec alatt is kb. 7 m-el változik a repülési magasság. A gyakorlatban az emelkedő, vagy a földfelszín felé közel függőlegesen lefelé haladó levegőáramlások (pl. microburst esetén) tehát számottevően változtatják meg a repülési magasságot.

A gyakorlatban szükséges az egyes sebességi összetevők egyidejű ismerete és azok hatásának egyidejű vizsgálata. A 4.4. ábrán a léggöri turbulencia sebességi összetevőinek időszorai láthatóak NASA-min statisztikai jellemzők mellett.



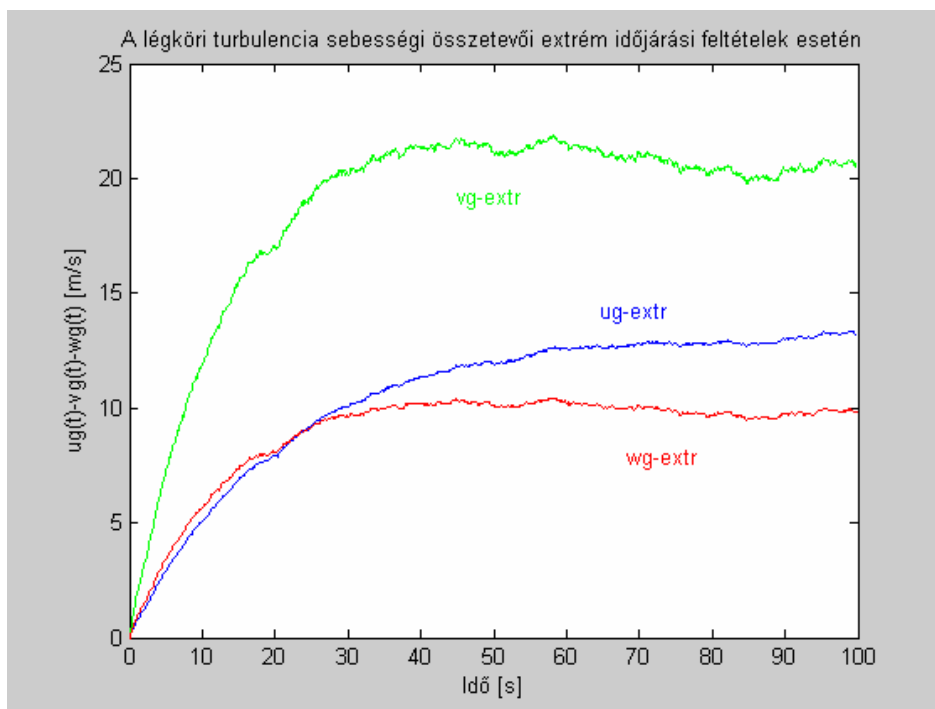
4.4. ábra. A léggöri turbulencia sebességi összetevői NASA-min feltételek esetén.

Hasonlóképpen, a 4.5. ábrán a léggöri turbulencia sebességi összetevőinek idősorai láthatóak NASA-max statisztikai jellemzők mellett.



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

Bár a gyakorlatban a repülések korlátozottak az időjárási minimumok (pl. szél, csapadék, látótávolság stb.) függvényében, az extrém időjárási feltételek vizsgálata még sem elhanyagolható, ugyanis a repülések során, ilyen nem számított környezeti feltételek mégis előfordulhatnak. A léggöri turbulencia McLean, D. által – extrém viharos időjárási feltételekre megadott – sebességi összetevői a 4.6. ábrán láthatóak [6].



4.6. ábra. A léggöri turbulencia sebességi összetevői extrém feltételek esetén.

A 4.6. ábra alapján könnyen belátható, hogy a repülőgép repülési feltételei, a repülőgép stabilitási feltételei – a turbulenciába történő berepülés után – nagyon gyorsan romlanak. Természetesen, e folyamatok hatása csökkenthető, de nem küszöbölhető ki maradéktalanul. Eme hatások kiküszöbölésére kínálkozik egy régi mondás, amely, bár eredetét tekintve a katonai repülésben keletkezett, mégis jól alkalmazható bármilyen típusú, és bármilyen rendeltetésű repülőgépre: „a termék a vitorlázó repülőök vágyálma, és a vadászrepülőök rémálma”. Vagyis, a legjobb elkerülni a turbulens zónákat, mivel a sztochasztikus jelleg miatt bármikor akár rosszabbak is lehetnek a repülés feltételei.

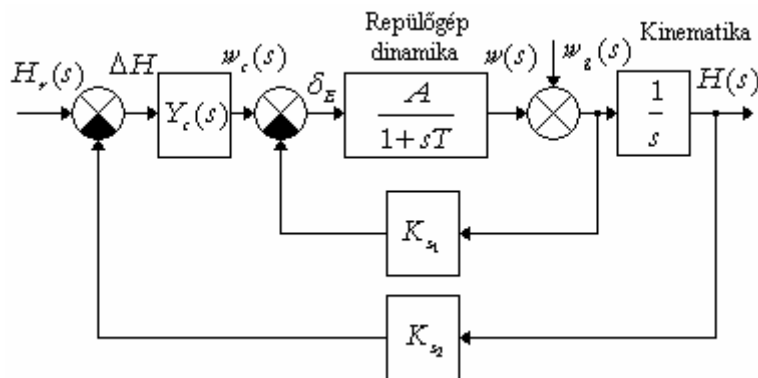
A fent elhangzottak alapján elmondható: a repülések automatizálása során célszerű csillapító automatákat, valamint automatikus repülésszabályozó rendszert tervezni, és telepíteni a repülőgépek fedélzetére.

A cikk – terjedelmi korlátok miatt – vizsgálatainkat a repülési magasság vizsgálatára korlátozza. Mindazonáltal, a cikk által bemutatott, és alkalmazott módszer kiterjeszhető, és alkalmazható más szabályozási rendszerekre is.

## V. A REPÜLÉSI MAGASSÁGSTABILIZÁLÓ RENDSZER ALAPJEL KÖVETÉSÉNEK, ÉS ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA.

Az automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezésére számos hagyományos (pl. Bode-módszer, Ziegler-Nichols módszer, Kessler-módszer, gyök-helygörbe módszer), valamint számos modern eljárás (pl. LQR módszer, LQG-módszer, LQG/LTR módszer,  $H_2$ -módszer,  $H_2LQG$ -módszer,  $H_\infty$ -módszer,  $\mu$ -szintézis módszer stb.). A fejezet célja megvizsgálni, hogy a kereskedelmi forgalomban is kapható, és a repülőgép típusától függetlenül a fedélzetre beépíthető, de utólagos hangolást igénylő robotpilóták (pl. MP2000, MP2028) milyen módon alkalmazhatóak?!

A magasságstabilizáló rendszerek feladata a repülési magasság állandó értéken tartása, vagy megadott algoritmus szerinti megváltoztatása függetlenül a külső, vagy a belső zajoktól. Egy hipotetikus repülőgép magasságstabilizáló rendszere a 5.1. ábrán látható. A szabályozási rendszerben alkalmazott jelölések az alábbiak:  $Y_c(s)$  - soros szabályozó,  $H_r$  - a repülési magasság referencia értéke,  $H$  - a repülési magasság pillanatnyi értéke,  $\Delta H$  - a repülési magasság stabilizálásának hibajele,  $w_c(s)$  - a belső szabályozási hurok referencia jele,  $w(s)$  - a függőleges sebesség,  $w_g(s)$  - külső zavarás, a légköri turbulencia függőleges sebességi összetevője,  $A$  - a repülőgép erősítési tényezője,  $T$  - a repülőgép időállandója,  $K_{s_1}$  - a sebességmérő átviteli függvénye, és végezetül,  $K_{s_2}$  - a magasságmérő átviteli függvénye.



5.1. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer hatásvázlata.

További vizsgálataink során az 5.1. ábrán látható magasságstabilizáló rendszer az alábbi átviteli függvényekkel rendelkezik:

$$Y_{A/C}(s) = \frac{w(s)}{\delta_E(s)} = \frac{A}{1+sT} = \frac{2,5}{1+0,5s}, \quad (5.1)$$

$$K_{s_1} = 0,7; K_{s_2} = 1, \quad (5.2)$$

További vizsgálataink során három statikus szabályozót vizsgálunk meg, a melyek rendre arányos (P-), arányos-integráló (PI-), és arányos-integráló-differenciáló (PID-) típusúak. Ennek megfelelően legyenek a soros kompenzátor átviteli függvényei az alábbiak:

$$Y_c|_P = 5, Y_c|_{PI} = 5 + \frac{1}{s}, Y_c|_{PID} = 5 + \frac{1}{s} + 1,5s. \quad (5.3)$$

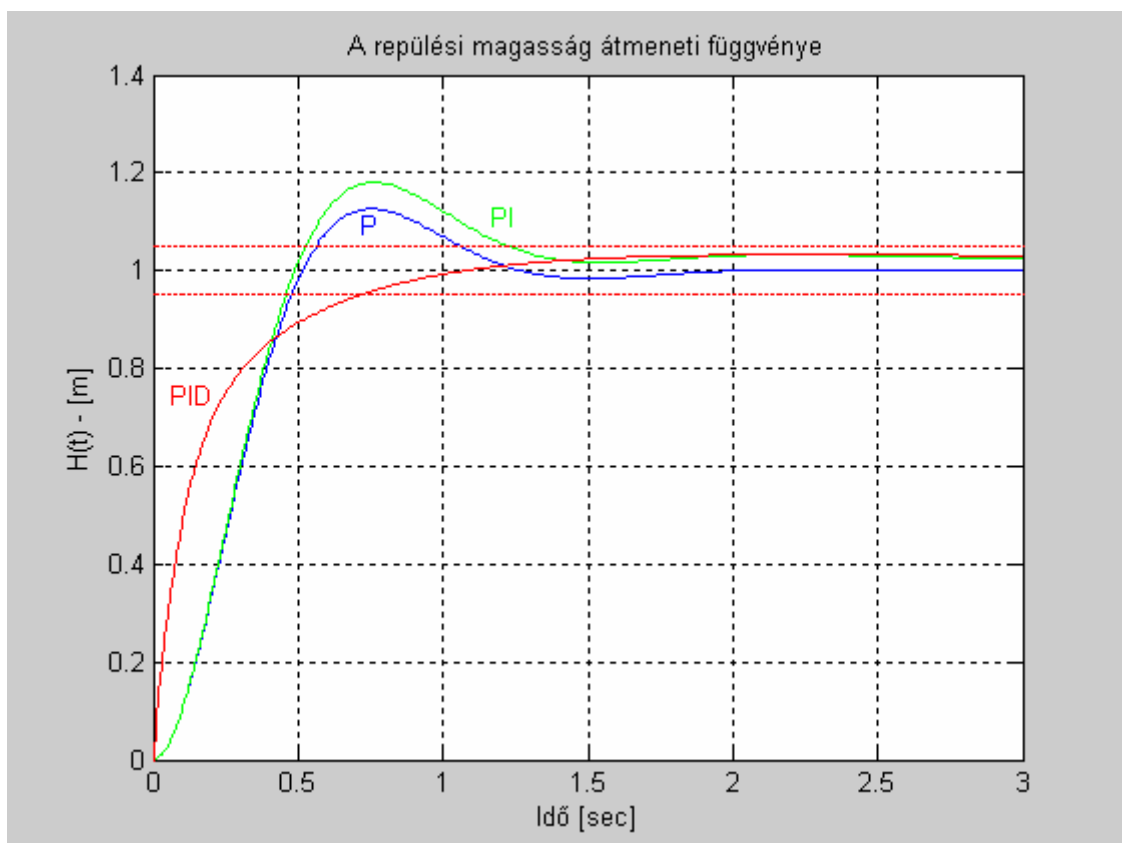
Ismeretes, hogy szabályozástechnikában a rendszerek vizsgálatát számos bemeneti jelre is el kell végezni. A cikk terjedelmi korlátai miatt csak az egységugrás bemeneti jelre számított átmeneti függvényeket határoztam meg. Ismeretes, hogy az átmeneti függvény alapján a zárt szabályozási rendszer számos minőségi jellemzője is meghatározható [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9].

### 5.1. A magasságstabilizáló rendszer alapjel követésének vizsgálata.

Az 5.1. ábrán látható szabályozási rendszer átmeneti függvényének meghatározása során a bemeneti jel az alábbi volt [2]:

$$H_r(t)|_{w_g(t)=0} = 1(t). \quad (5.4)$$

A zárt szabályozási rendszer válaszejele, más szóval, az átmeneti függvény az 5.2. ábrán látható.



5.2. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer átmeneti függvényei.

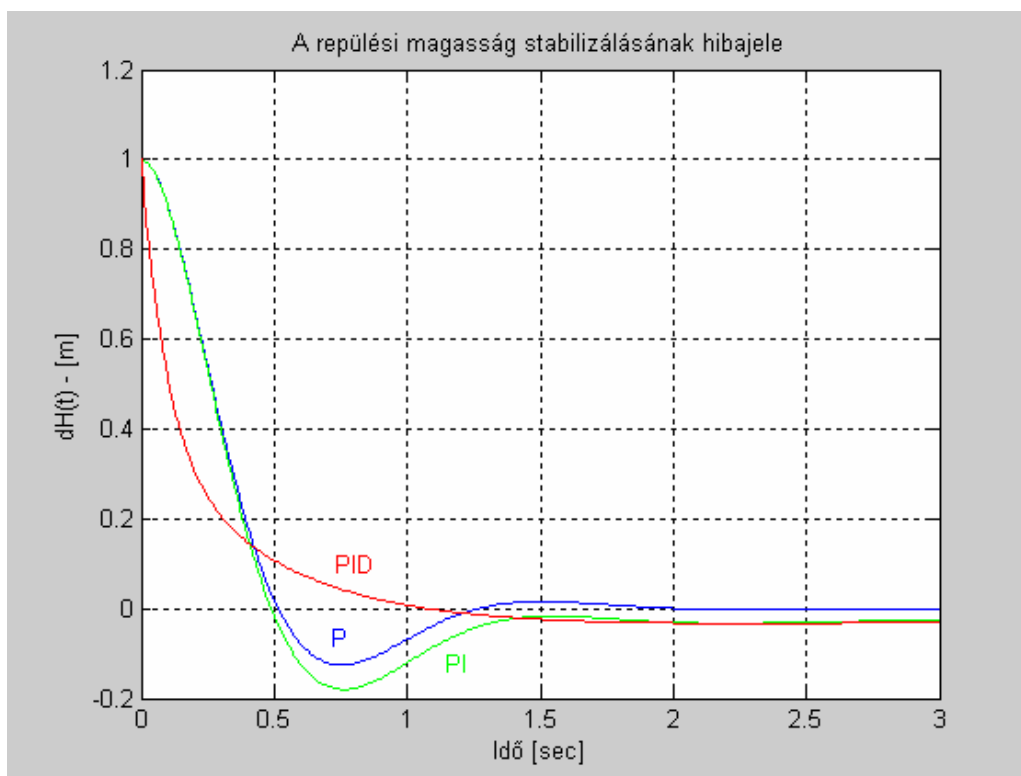
A zárt szabályozási rendszert mind a három, az (5.3) egyenlettel megadott szabályozó esetén megvizsgáltuk. Megállapítható, hogy a különféle szabályozó struktúrák alapvetően befolyásolják a minőségi jellemzőket. Az egyszerűség miatt, mi most csak a tranziens időre korlátozzuk a vizsgálatunkat, amelyek az alábbiak voltak:

$$t_{tr|P} \cong 1,1s, t_{tr|PI} \cong 1,25s, t_{tr|PID} \cong 0,7s. \quad (5.5)$$

Az (5.5) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy a soros P-szabályozó integráló (I) hatással történő kiegészítése a tranziens idő növekedését eredményezi. Ez a növekmény azonban, bizonyos minőségi követelmények esetén nem eredményezi a szabályozási rendszer paramétereinek a követelményrendszeren kívül kerülését. A másik dolog, amit megfigyelhetünk, hogy a repülési magasság stabilizálása statikus hibával történik. Más szóval, a repülési magasság stacioner értéke nem éri el a kívánt egységnyi értéket. Mindazonáltal, az integráló (I) hatás zavarelhárítás során mutatott előnyös tulajdonsága miatt széles körben nyer alkalmazást.

Szabályozástechnikából ismeretes, hogy a szabályozási rendszerek soros kompenzátoraiban alkalmazott differenciáló-hatás gyorsítja a rendszer működését, és javítja a minőségi jellemzőket. Nem szabad azonban szem elől téveszteni, hogy a differenciális mindig zajkiemelő hatású, így óvatosan kell bánni annak alkalmazásával [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10].

Az 5.3. ábrán az automatikus magasságstabilizáló rendszer statikus hibáinak idősorai látható.



5.3.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer statikus hibái.

Az 5.3. ábrán jól látható, hogy az integráló szabályozás rontja a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőit, míg a differenciáló hatás gyorsítja a tranziens folyamatokat.

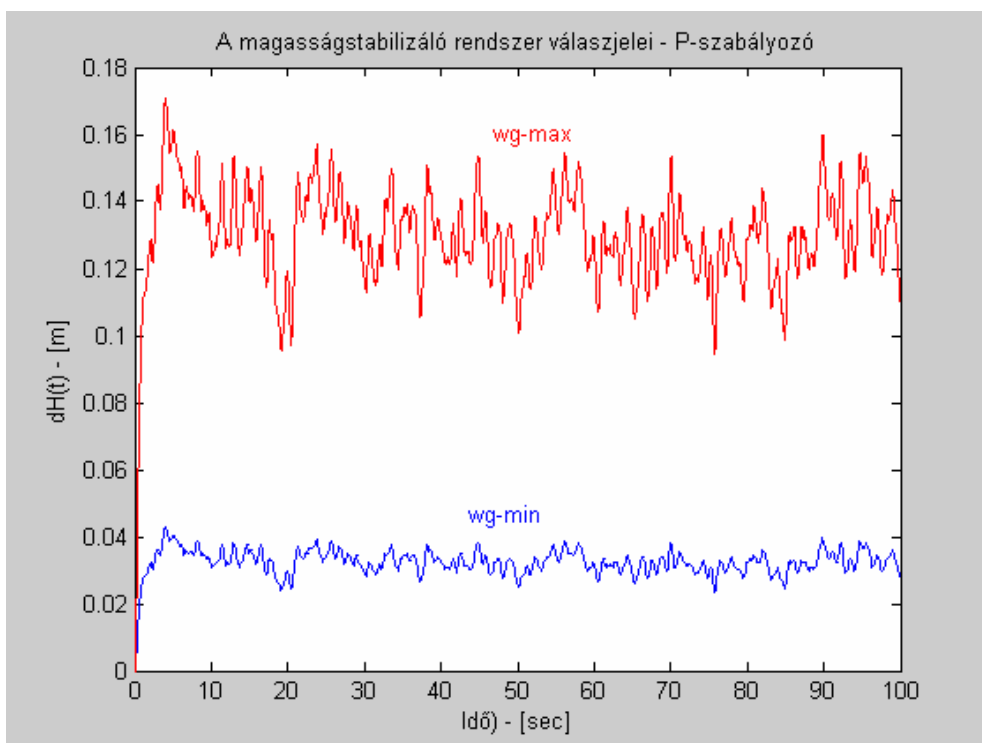
Összességében megállapítható, hogy a zárt szabályozási rendszer eleget tesz a működési feltételeknek, így a bemutatott PID-szabályozó jó eredménnyel alkalmazható a repülési magasság automatikus stabilizálására.

## 5.2. A magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata.

Érdekes területet képvisel a zárt szabályozási rendszer vizsgálata sztochasztikus bemeneti jel hatására. Jól ismert tény, hogy a repülés során a levegő – szinte – sohasem tekinthető nyugodtnak. Az előző fejezetekben bemutatott turbulencia modellek, illetve sztochasztikus idősorok jól alkalmazhatóak a zárt szabályozási rendszerek zavarelhárító képességének vizsgálata során. Eme feladat megoldása során – zérus értékű bemeneti jel mellett – a zárt szabályozási rendszer formális bemeneti jelének tekintjük a

$$w_g(t) \Big|_{H_r(t)=0} \quad (5.6)$$

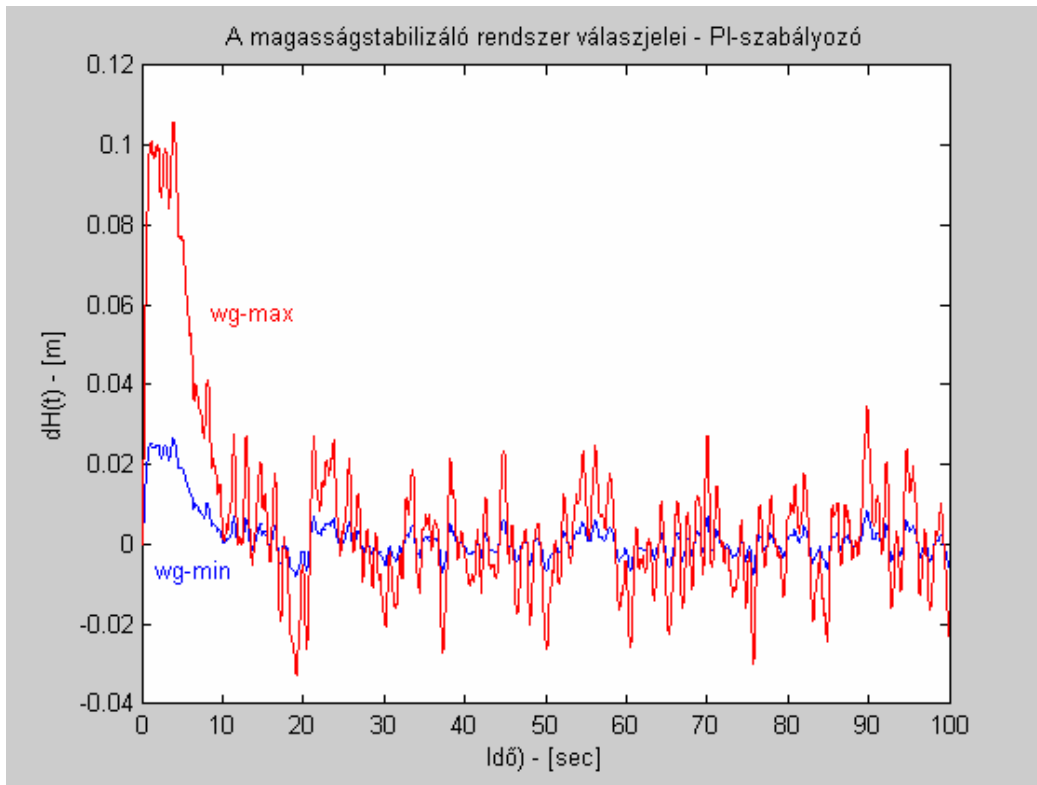
sztochasztikus jelet, amelyet különféle időjárási feltételek (kis értékű turbulencia, nagy értékű turbulencia, extrém turbulencia) mellett is meghatároztunk. A különféle szabályozókkal működő automatikus repülésszabályozó rendszerek válaszjelei az 5.4., 5.5., és az 5.6. ábrákon látható.



5.4.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

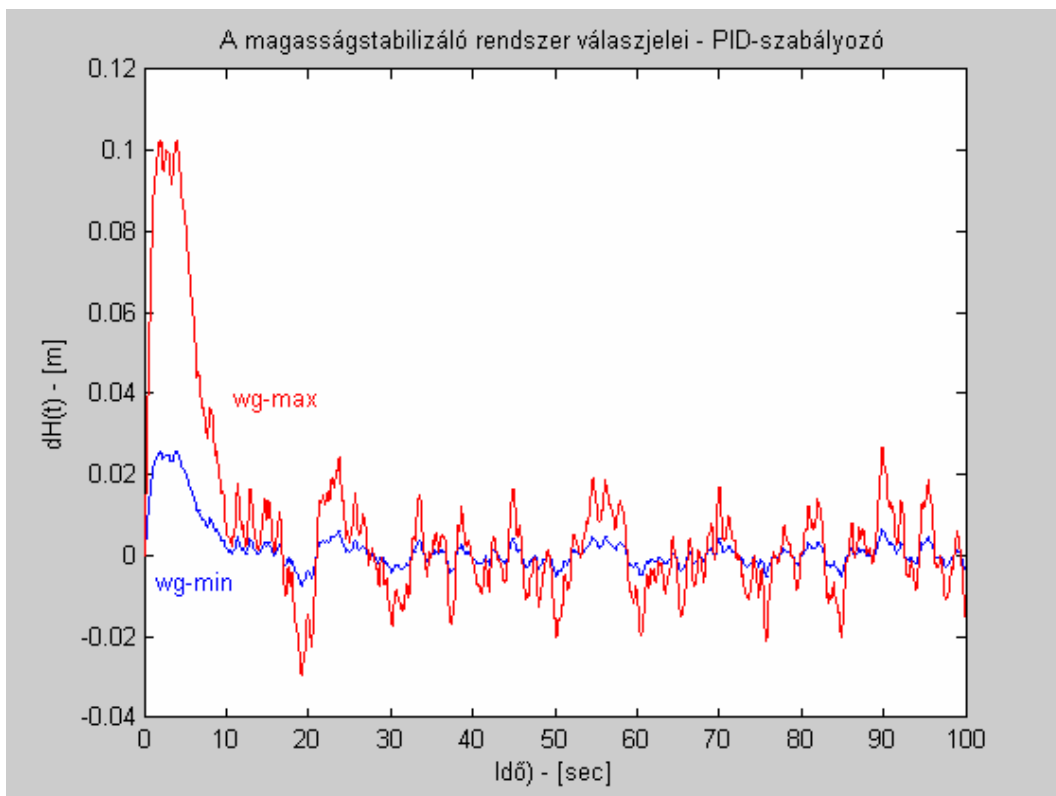
Az 5.4. ábrán jól látható, hogy az egyszerű P-szabályozó nem képes teljesen kiszűrni a sztochasztikus külső zavarás (függőleges szél) hatását, és az időjárási feltételek romlásával egyre nagyobb a rendszer kimeneti jele. Megemlíteni szükséges, hogy most a rendszer valós bemeneti (referencia) jele zérusértékű. A statikus hiba nagyság azonban előre vetíti, hogy a 5.4. ábrán látható jelek értéke olyan kicsi, hogy azt a magasságérzékelő – gyakran – nem is képes érzékelni. A gyakorlatban szintén sokszor fordul elő az is, hogy a magasságérzékelő kimeneti jelét, még a visszacsatoló ágban szűrik, és a turbulencia által okozott jelösszetevőt próbálják minimálni, esetleg teljesen kiszűrni.

Az 5.5. ábrán jól látható, hogy a PI-szabályozó alkalmazása miatt, bár a rendszer kimeneti jele nem csökken, a repülési magasság még a rosszabb időjárási feltételek mellett is, az ideális zérusértékű jel körül néhány szekundumos időállandóval leng. Stacioner állapotban a magasságváltozás mindössze néhány centiméter, ami elhanyagolhatóan kis értékű.



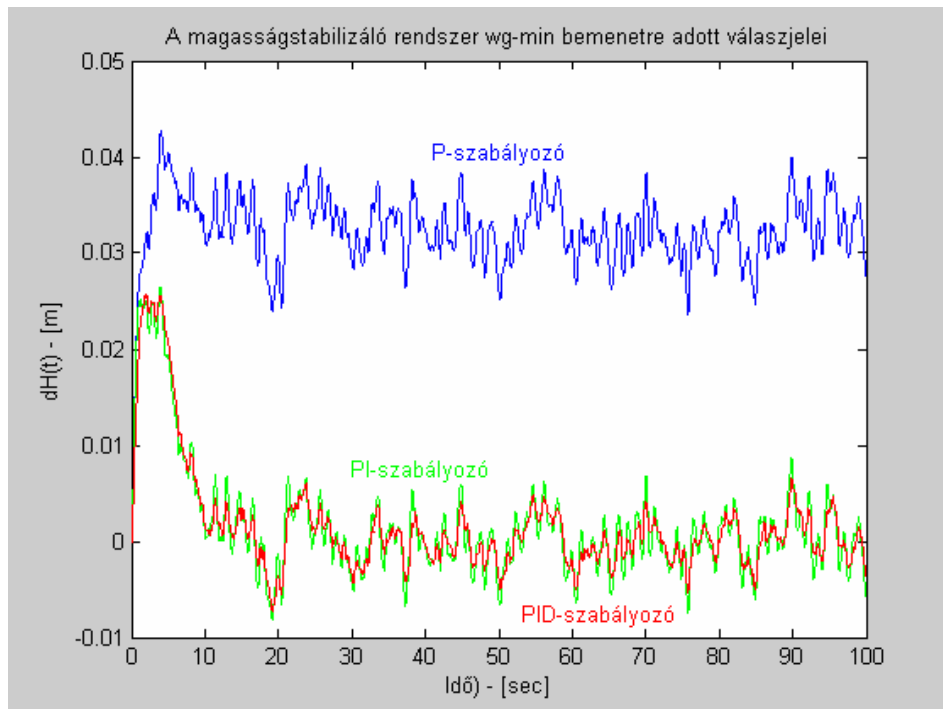
5.5. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

Az 5.6. ábra alapján a PID-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerre hasonló megállapítások tehetőek, mint azt az előbb ismertettük.

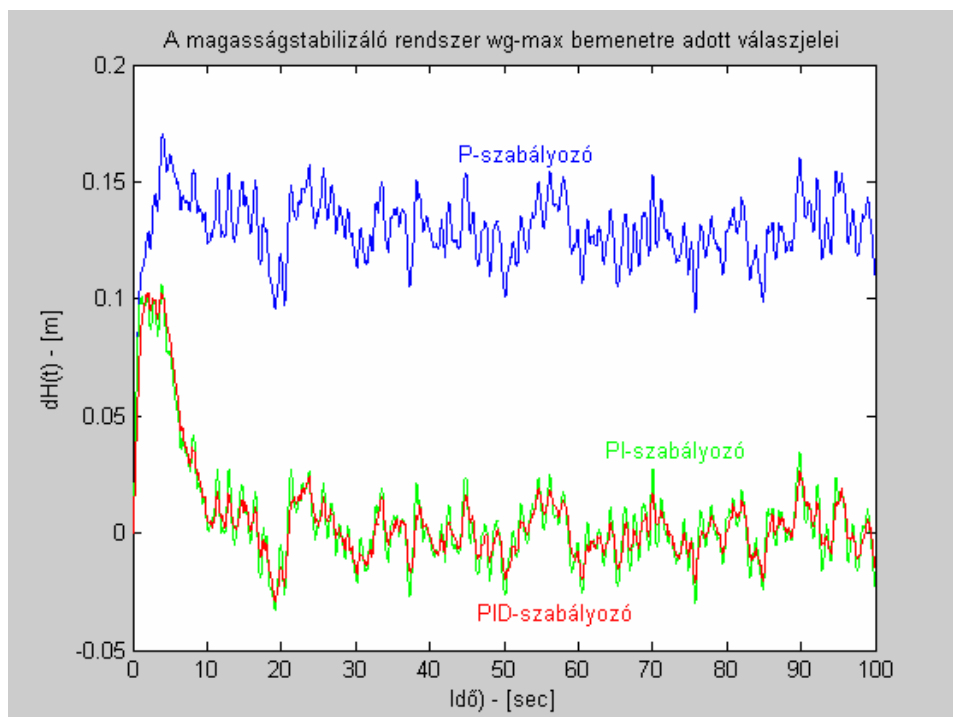


5.6. ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

A gyakorlatban érdeklősére tarthat számot annak vizsgálata, hogy az egyes szabályozó típusok – különféle időjárási viszonyok mellett – hogyan látják el szabályozástechnikai feladataikat?! A 3. fejezetben megadott NASA-min, és NASA-max időjárási feltételek mellett a magasságstabilizáló rendszer válaszeleit az 5.7., és az 5.8. ábra mutatja be.



5.7.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.



5.8.ábra. Az automatikus magasságstabilizáló rendszer válasza a sztochasztikus zavaró jellemzőre.

Az 5.7., és a5.8. ábrák alapján könnyen belátható, hogy még a rosszabb időjárási NASA-max feltételek mellett sem lesz nagy értékű a repülési magasság statikus hibája.



## VI. KÖVETKEZTETÉSEK.

A szerző a cikkben:

- ☺ összefoglalta a légköri turbulencia matematikai modellezésére vonatkozó elméleti ismereteket;
- ☺ összefoglalta a NASA-min, NASA-max, illetve az extrém légköri jelenségek statisztikai jellemzőit;
- ☺ meghatározta a NASA-min, NASA-max, illetve az extrém légköri jelenségek idősorainak szűréséhez elengedhetetlenül szükséges lineáris szűrők paramétereit;
- ☺ MATLAB<sup>®</sup> környezetben létrehozta a légköri turbulencia sebességi összetevőinek idősorait;
- ☺ elvégezte a repülési magasságstabilizáló rendszer alapjel követésének vizsgálatát;
- ☺ elvégezte a repülési magasság stabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálatát;
- ☺ megállapította, hogy a szabályozóban alkalmazott integráló hatás rontja ugyan az alapjel követés minőségi jellemzőit, de lényeges mértékben javítja a zavarelhárítási képességet;
- ☺ a kereskedelmi forgalomban is kapható PID-szabályozók (pl. MP2000, MP2028) eredményesen alkalmazhatóak az automatikus repülésszabályozó, többek között a magasságstabilizáló rendszerekben is, ha sikerül az elengedhetetlenül szükséges hangolást elvégezni.

## VII. SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK.

- [1] Korn, G. A. *Random-Process Simulation and Measurements*, McGraw-Hill Book Company, New York-Toronto-London-Sydney, 1966.
- [2] Csáki, F. *Szabályozások dinamikája – lineáris rendszerek*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974.
- [3] Асланян, А. Э.: *Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов*, Часть I, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, Киев, 1984.
- [4] Красовский, А. А. – Вавилов, Ю. А. – Сучков, А. И.: *Системы автоматического управления летательных аппаратов*, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, Москва, 1986.
- [5] Dr. Rohács, J. – Simon, I. *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
- [6] McLean, D. *Automatic Flight Control Systems*, Prentice-Hall, Int., New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore, 1990.
- [7] Shahian, B. — Hassul, M. *Control System Design Using MATLAB<sup>®</sup>*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [8] *Control System Toolbox 5.1 for Use with MATLAB<sup>®</sup>* (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
- [9] MATLAB<sup>®</sup> 6.5 – *The Language of Technical Computing*, User's Guide, The MathWorks, Inc., 2002.
- [10] MIL-STD-1797A, Notice 3, *Flying Qualities of Piloted Aircraft*, Department of Defense Interface Standard, 2004.
- [11] Pokorádi, L. *Introduction to Mathematical Diagnostics – I. Theoretical Backgrounds*, Technical Bulletins of Debrecen, HU ISSN 1587 9801, Vol. 2007/1., p(65-80).

# **TURBULENCE MODELS AND THEIRS APPLICATION IN AUTOMATIC FLIGHT CONTROL SYSTEMS**

## **RESUME**

This paper deals with mathematical modeling of the atmospheric turbulences, and deals with theirs application in computer aided design and analysis of the automatic flight control systems. The aim of the author is to show stochastic mathematical models applied to model velocity components of the resulting atmospheric turbulence speed. In the paper author uses NASA-statistical models to describe statistical parameters of the turbulent air. Dealing with turbulence mathematical models author shows a worst-case model having extreme statistical values in their random time series. The second topic being investigated in this paper is to derive whether the so-called COTS-design (**C**ommercial-**o**ff-**t**he-**s**helves) technology is applicable to design automatic flight control systems, or not? The simple height control system will be analyzed for reference signal tracking ability, and for disturbance rejecting ability. Final statement about applicability of the common autopilots, i.e. MP2000, or MP2028 on the board of the aircraft will be done.