

A SZOJKA-III TÍPUSÚ PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZ SZTOCHASZTIKUS ANALÍZISE

A cikkben szereplő SZOJKA típusú pilóta nélküli repülőeszközön kívül még nagyon sok féle létezik, melyek a felhasználási területükben és így felszereltségükben különböznek egymástól, mégis működésük hasonló elven valósul meg. Minden repülőeszköz egy szabályozási rendszernek tekinthető, amelynek különböző minőségi követelményeknek kell, hogy megfeleljen. Az automatikus szabályozási rendszerek lehetővé teszik, hogy a repülőgép sokoldalúan felhasználható legyen, és a repülés biztonsága növekedjen. Az optimális szabályozási rendszerek tervezéséhez számos tervezési eljárás áll rendelkezésre, valamint jól alkalmazhatók a matematikai és irányítástechnikai szoftverek.

A cikkben törekedtem arra, hogy bemutassam a sztochasztikus analízishez szükséges elméleti ismeretek és ezen ismeretekre alapozva elkészítettem a SZOJKA típusú pilóta nélküli repülőgép sztochasztikus analízisét. Az analízishez a MATLAB program Control System Toolbox-át használtam. A számítógépes szimuláció előnyei: az egyszerű kezelhetőség és rugalmasság, az adatok eltárolhatók későbbi feldolgozás illetve újra felhasználásra.

A LÉGKÖRI TURBULENCIA MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

A repülésszabályozó rendszerrel rendelkező légi járművek 3 dimenziós térbeli mozgását befolyásoló zavarásokat két részre oszthatjuk: külső zavarások és belső zajok. Belső zajok lehetnek például az érzékelők és erősítők zajai. Külső zavarások közé tartoznak a következők: légköri turbulencia, időjárási viszonyok, elektromágneses zajok, külső függesztmények változása (tömeg változása, áramlási viszonyok változása) stb.

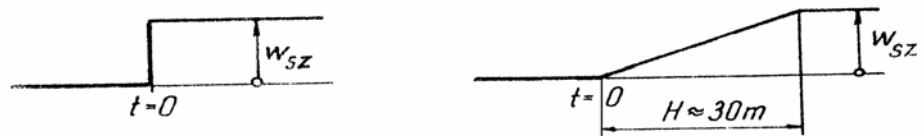
A külső zavaró tényezők közül az egyik legfontosabb a légköri turbulencia. Turbulenciáról akkor beszélünk, ha a levegő egy adott (kritikus) áramlási sebességet átlépve benne örvényképződés indul meg. Ennek hatására ezek a rétegek részecskéi vagy részecske csoportjai átlépnek egyik rétegből a másikba. Tehát a levegő ezen örvénylő, keveredő áramlását nevezzük turbolens áramlásnak vagy röviden turbulenciának. Létrejöttében több tényező is szerepet játszik, úgy, mint a tereptárgyak, a domborzat, a Nap sugárzásából származó hőenergia, a nagy légkörczések, a ciklonok és anticiklonok hatása [1, 9].

A matematikai modellezés során két módszert alkalmazhatunk: *determinisztikus* és *sztochasztikus*.

A determinisztikus modellezés

A determinisztikus modellezés során a következő két esetet különböztethetjük meg: a szellőkés és az „1-cos” függvény.

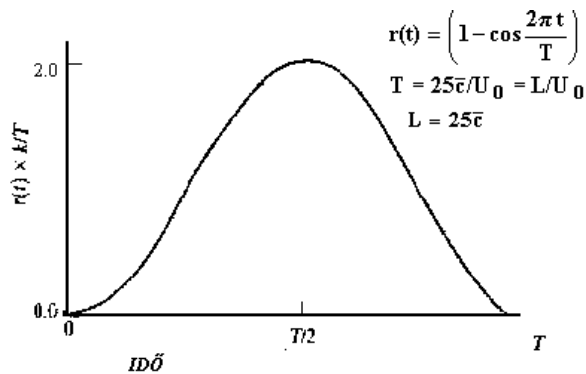
A szellőkés



1. ábra. Éles szél és fokozatos szél

A légkörben a szellőkés megoszlása rendezetlen és véletlenszerű, s így pontosan nem ismeretes. A függőleges sebesség változásától függően beszélhetünk éles szélű szellőkésről és fokozatos szellőkésről. Az első esetben a szellőkés ugrásszerűen jelentkezik, míg a másodikban a függőleges sebesség bizonyos H szakaszon (aminek hossza mérések szerint kb. 30 m) fokozatosan (pl. lineárisan) növekszik fel w értékére [1, 2, 3].

Az „1-cos” függvény



2. ábra. Az (1-cos) függvény

Az „1-cos” függvény a következő alakban adható meg:

$$v(t) = \frac{k}{T} \left(1 - \cos \left(2 \frac{\pi}{T} t \right) \right) \quad (1)$$

ahol: $T = \frac{L}{v_0}$ — időtartam;
 $L = 25 \bar{c}$ — léptéktényező;
 v_0 — egyensúly, méter/sec;
 k — arányossági tényező, szél intenzitás [1, 2, 3].

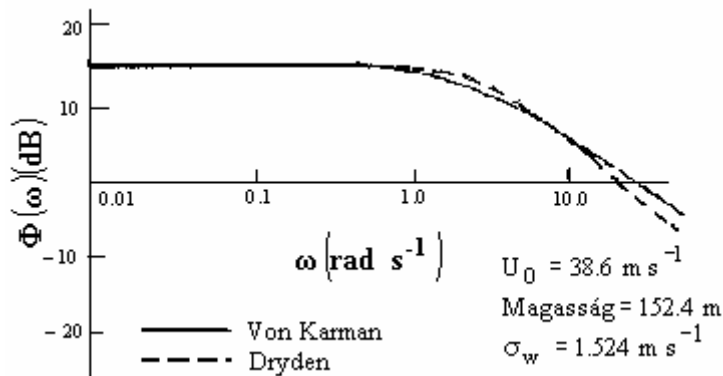
A sztochasztikus modellezés

A sztochasztikus modellezés során a Kármán és a Dryden modelleket kell megemlíteni. A Kármán modell (2) a teljesítmény-sűrűség függvény pontosabb leírását adja meg. Mivel a kifejezésben nem egész számok szerepelnek, így ez bonyolultabb számítást igényel. A Dryden modell (3) esetében az együtthatók egyszerűbbek, így kicsit pontatlan eredményt ad. A továbbiakban az egyszerűbb, vagyis a Dryden modellt használom fel az analízis elvégzéséhez [1, 2, 3].

$$\Phi_{\text{VK}}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{\left[1 + \frac{8}{3}(1,339L\Omega)^2\right]}{\left[1 + (1,339L\Omega)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \quad (2)$$

$$\Phi_{\text{Dry}}(\Omega) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{(1 + 3L^2\Omega^2)}{(1 + L^2\Omega^2)^2} \quad (3)$$

A két modell teljesítmény-sűrűségfüggvény közötti különbséget a 3 ábrán figyelhetjük meg.



3. ábra. Karman és Dryden teljesítmény-sűrűség függvény

Ahol: Φ_{VK} és Φ_{Dry} — a Kármán és Dryden modell szerint a légköri turbulencia teljesítmény-sűrűség függvénye (a testkoordináta rendszerben),

$$\left. \begin{aligned} L_u = L_v = L_w = 1750 \text{ ft} \\ L_w = h_{cg} \text{ ft} \\ L_u, L_v = 145 h_{cg} \text{ ft} \end{aligned} \right\} \text{integrál lépték tényezők,}$$

σ szórás, Ω a térbeli körfrekvencia, valamint, a légköri turbulencia intenzitásának átviteli komponense:

$$\frac{\sigma_u^2}{L_u} = \frac{\sigma_w^2}{L_w} = \frac{\sigma_v^2}{L_v} \text{ Dryden modell szerint}$$

$$\frac{\sigma_u^2}{L_u^{2/3}} = \frac{\sigma_v^2}{L_v^{2/3}} = \frac{\sigma_w^2}{L_w^{2/3}} \text{ Karman modell szerint}$$

Megadható a légköri turbulencia test-koordinátarendszer tengelyeire eső sebességi összetevők rendteljesítmény-sűrűség függvényei, amelyek a következő alakban írhatók le:

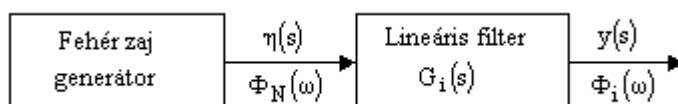
$$\left. \begin{aligned} \Phi_u(\Omega) &= 2\sigma_u^2 \frac{L_u}{\pi} \frac{1}{(1 + L_u \Omega)^2} \\ \Phi_v(\Omega) &= \sigma_v^2 \frac{L_v}{\pi} \frac{(1 + 3(L_v \Omega)^2)}{[1 + (1 + L_v \Omega)^2]^2} \\ \Phi_w(\Omega) &= \sigma_w^2 \frac{L_w}{\pi} \frac{(1 + 3(L_w \Omega)^2)}{[1 + (L_w \Omega)^2]^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ahol: $\sigma_i^2 \triangleq \int_0^\infty \Phi_i(\Omega) d\Omega_i = u, v, w$ és $\omega = U_0 \Omega$, akkor,

$$\left. \begin{aligned} \Phi_u(\omega) &= \frac{2\sigma_u^2 L_u}{\pi U_0} \frac{1}{[1 + (L_u/U_0)^2 \omega^2]} \\ \Phi_v(\omega) &= \frac{\sigma_v^2 L_v}{\pi U_0} \frac{[1 + 3(L_v/U_0)^2 \omega^2]}{[1 + (L_v/U_0)^2 \omega^2]^2} \\ \Phi_w(\omega) &= \frac{\sigma_w^2 L_w}{\pi U_0} \frac{[1 + 3(L_w/U_0)^2 \omega^2]}{[1 + (L_w/U_0)^2 \omega^2]^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

A SZTOCHASZTIKUS JELEK LÉTREHOZÁSA MATLAB® KÖRNYEZETBEN

Adott intenzitású sztochasztikus jelet létrehozhatunk egy lineáris szűrő segítségével, ha meghatározzuk annak időtartamát, a sebességét, a magasságát és a teljesítmény-sűrűség függvényét. A szűrő bemenetére a fehér zaj generátor kimeneti jele kerül, $\eta(s)$ és $\Phi_N(\omega)$, kimeneti jelként $y(s)$ és $\Phi_i(\omega)$ fog megjelenni [1, 2, 3].



4. ábra. Blokk diagram

A folyamatot a következő egyenlettel adhatjuk meg:

$$\Phi_i(\omega) = |G_i(s)|_{s=j\omega}^2 \Phi_N(\omega) \quad (6)$$

ahol: $\Phi_N(\omega) = 1,0$ és $\Phi_i(\omega) = |G_i(s)|_{s=j\omega}^2$.

A szűrők a test-koordináta-rendszer tengelyeire megadhatók a következő alakban:

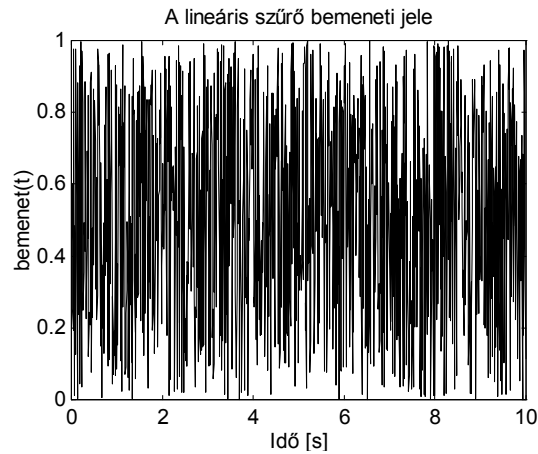
$$\left. \begin{aligned} G_u(s) &= \frac{\sqrt{K_u}}{(s + \lambda_u)} \\ G_v(s) &= \sqrt{K_v} \frac{(s + \beta_v)}{(s + \lambda_v)^2} \\ G_w(s) &= \sqrt{K_w} \frac{(s + \beta_w)}{(s + \lambda_w)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ahol: az együtthatók az alábbi formában adható meg:

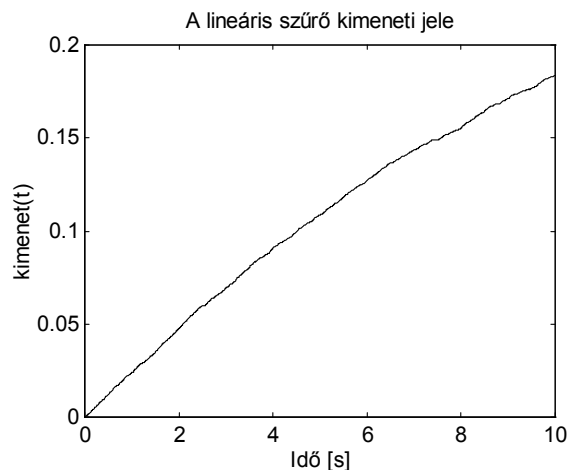
$$K_u = \frac{2U_0\sigma_u^2}{\pi L_u}; K_v = \frac{3U_0\sigma_v^2}{\pi L_v}; K_w = \frac{3\sigma_w^2}{\pi L_w U_0}; \beta_v = \frac{U_0}{\sqrt{3L_v}}; \beta_w = \frac{U_0}{\sqrt{3L_w}}$$

$$\lambda_u = \frac{U_0}{L_u}; \lambda_v = \frac{U_0}{L_v}; \lambda_w = \frac{U_0}{L_w}$$

A 4. ábrán látható blokkdiagram alapján a MATLAB[®] beépített segédfüggvényeivel a következő sztochasztikus jelet hoztam létre, amely a lineáris szűrő bemeneti (5. ábra) és kimeneti (6. ábra) jelét képezi:

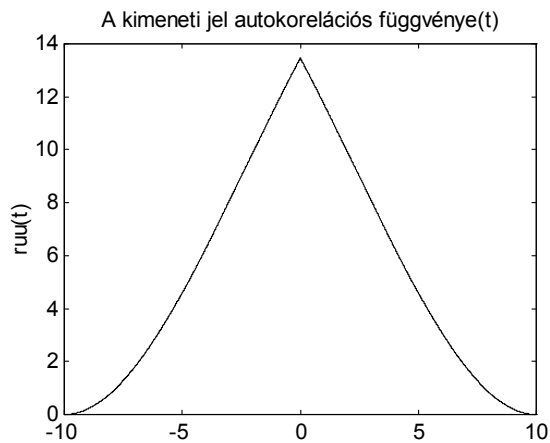


5. ábra. A lineáris szűrő bemeneti jele

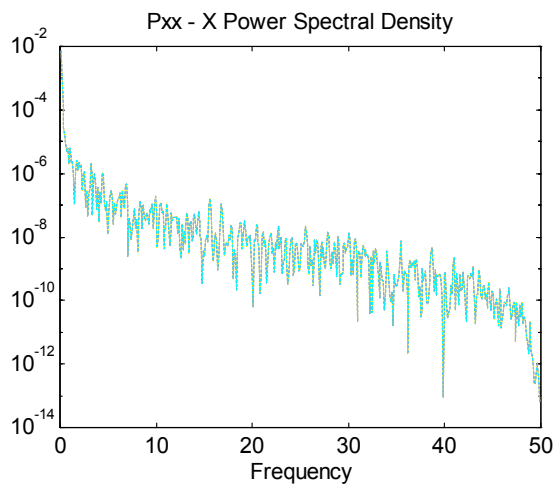


6. ábra. A lineáris szűrő kimeneti jele

A 7. és 8. ábrákon a létrehozott véletlen jel autokorrelációs és teljesítménysűrűség függvénye látható. Az autokorrelációs függvény a teljesítménysűrűség függvényből számítható szimmetrikus függvény, amelyből a folyamat dinamikájára és sávszélességére következtethetünk. A sávszélességből pedig a vizsgált rendszer időállandóit határozhatjuk meg [1].



7. ábra. A kimeneti jel autokorelációs függvénye

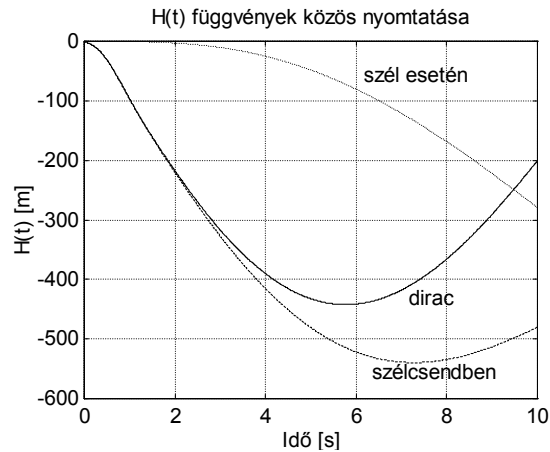


8. ábra. A kimeneti jel teljesítmény-sűrűség függvénye

A SZOJKA-III TÍPUSÚ PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZ SZTOCHASZTIKUS ANALÍZISE

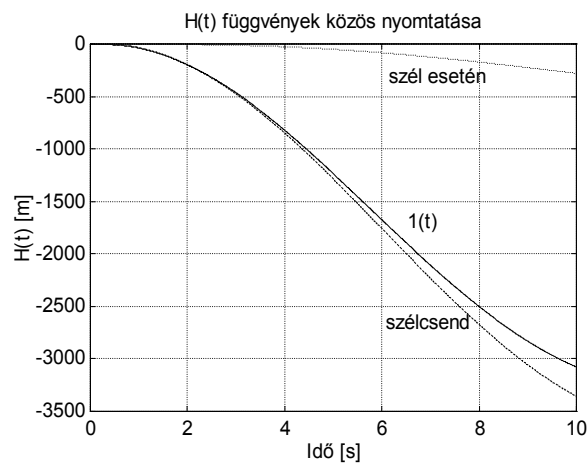
A SZOJKA-III típusú repülőgép számítógépes analízise során több esetet hasonlítottam össze (a sebesség minden esetben állandó, hol a magasság, hol pedig a tömeg változik) különválasztva a hosszirányú és az oldalirányú mozgást. A sztochasztikus analízishez ezen modellek közül egyet kiválasztva mutatom be a kapott eredményeket. A vizsgálatot a következő paraméterekre végeztem el: sebesség 150 km/h, magasság: 400 m, tömeg: 135 kg, hosszirányú mozgás [4, 5, 6, 7].

A 9. ábrán három görbét látunk közös koordináta rendszerben nyomtatva: a nemirányított repülőgép válaszfüggvényeit különböző bemeneti jelekre. Míg az egységnyi bemeneti jelre kezdeti zérus érték után közel lineáris csökkenés figyelhető meg, addig a másik két esetben közel azonos menetű görbét kapunk. Ezek a görbék nulla értékről meredeken csökkennek, majd pedig hasonló meredekséggel növekvő értékhez tartanak.



9. ábra. Nemirányított repülőgép válaszfüggvényei különböző bemeneti jelekre

A 10. ábrán szintén három görbét nyomtattam közös koordináta rendszerben: a nemirányított repülőgép válaszfüggvényeit különböző bemeneti jelekre. Az egységugrás bemenetre és a szélcsendben a görbék közel azonos értékeket vesznek fel, zérus értékről lineárisnak mondhatóan negatív értékhez tartanak. Míg zavarás mellett közel állandó értéket vesz fel a görbe.



10. ábra. A nemirányított repülőgép válaszfüggvényeit különböző bemeneti jelekre

Az időtartománybeli minőségi jellemzők számítása. Az eredményeket az 1.táblázatban foglaltam össze. A csillapítási tényező meglehetősen kicsi értékű, ami dinamikus folyamatra enged következtetni. A saját értékek rendelkeznek negatív valós résszel, amiből az következik, hogy a rendszer stabilis működésű.

Az időtartománybeli minőségi jellemzők számítása 1.táblázat

Sajátérték	Csillapítási tényező	Körfrekvencia [rad/s]
Hosszirányú mozgás — v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg		
0	- 1	0
$-0,0258 \pm 0,2971 i$	0,0866	0,2982
$-2,2797 \pm 3,6071 i$	0,5342	4,2671

SZABÁLYOZÓ TERVEZÉSE LQR OPTIMÁLIS SZABÁLYOZÓ ELJÁRÁSSAL ÉS ANNAK ANALÍZISE

Az LQR (Linear Quadratic Regulator) módszer determinisztikus, többváltozós, teljes állapot visszacsatolású rendszerek szabályozóinak tervezésére szolgáló időtartománybeli algoritmus. A módszer feltételezi, hogy a dinamikus rendszer összes állapot változója érzékelőkkel mérhető. Keressük azt az optimális vezérlési törvényt, amelyik biztosítja, hogy a szabályozási rendszer úgy kerül egyik egyensúlyi állapotból a másik egyensúlyi állapotba, hogy egy előre meghatározott integrál kritérium minimális értéket vegyen fel [1, 8]. A leggyakrabban használt integrál kritérium függvény:

$$J = \int_0^T f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt \quad (8)$$

Ezt a (8) célfüggvényt minimalizálni kell, mivel a költségek csökkentésére törekszünk. Az autonóm esetet figyelembe véve:

$$J = \int_0^T f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \text{MIN} \quad (9)$$

Önmagában stabilis, lineáris, autonóm szabályozása rendszer állapotegyenletét és kimeneti egyenletét az alábbi alakban szokás megadni:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}; \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (10)$$

Ahol: \mathbf{x} állapotvektor, \mathbf{y} kimeneti vektor, \mathbf{A} állapotmátrix, \mathbf{B} bemeneti mátrix, \mathbf{C} kimeneti mátrix, \mathbf{D} közvetlen előrevezetési mátrix.

A minimalizálandó célfüggvény más alakban:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \rightarrow \text{Min} \quad (11)$$

Ahol a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} súlyozó mátrix. Elemeit az állapotváltozók maximális értékéből számítjuk a négyzetes reciprok szabály használatával.

Keressük a \mathbf{K} teljes állapot visszacsatolási mátrix értékét. Tekintsük a referencia jelet zérusnak. Így az optimális vezérlési törvény:

$$\mathbf{U}^0 = -\mathbf{K} \mathbf{x} \quad (12)$$

Ha az optimális vezérlési törvényt (12) behelyettesítjük az állapotegyenletbe (10), és azt pedig az integrál kritériumba, majd azt rendezve megkapjuk:

$$\mathbf{K}^0 = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (13)$$

Az elfajult Ricatti féle mátrix egyenlet:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (14)$$

A (14) egyenletből meghatározzuk a \mathbf{P} költségmátrixot, majd ezt behelyettesítjük az optimális állapot visszacsatolási mátrix egyenletébe (12) és megkapjuk a \mathbf{K} állapot visszacsatolási mátrixot. A szabályozótervezés folyamata a következő: a súlyozó mátrixok kiindulási értékét az állapotváltozók maximális értékének reciproka adja. Ezekkel a súlyozó mátrixokkal kiszámoljuk az állapot visszacsatolási mátrix értékét, majd a vizsgáljuk a zárt rendszer jellemzőit. Ha a minőségi követelményeknek nem felel meg a szabályozási rendszer, akkor a súlyozó mátrixok értékét kell változtatni, és újra vizsgálni a rendszer jellemzőit. Ezt a folyamatot addig kell folytatni. Míg meg nem elégszünk a rendszer minőségi jellemzőivel. A súlyozó mátrixok hangolása heurisztikus módon történik. A mátrixok megadásánál figyelembe kell venni, hogy az egyes mátrixok elemei fogják meghatározni az egyes erősítések nagyságát és így annak méret, tömeg, és energia felhasználás vonzata van [1, 8].

A szabályozó előzetes tervezése során, mivel nem állt rendelkezésemre információ az egyes állapotváltozók, és a bemeneti jel maximális értékéről, ezért, a szabályozó előzetes tervezése első lépésében az ún. azonos súlyozás elvét alkalmaztam. E módszer lényege, hogy a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} mátrixok zérustól eltérő elemei egységnyi értékűek. E beállítással szabályozót terveztem, és megvizsgáltam, hogy a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőit megfelelnek-e az előírásoknak. Megállapítottam, hogy azok (pl. a túlszabályozás) meghaladja az

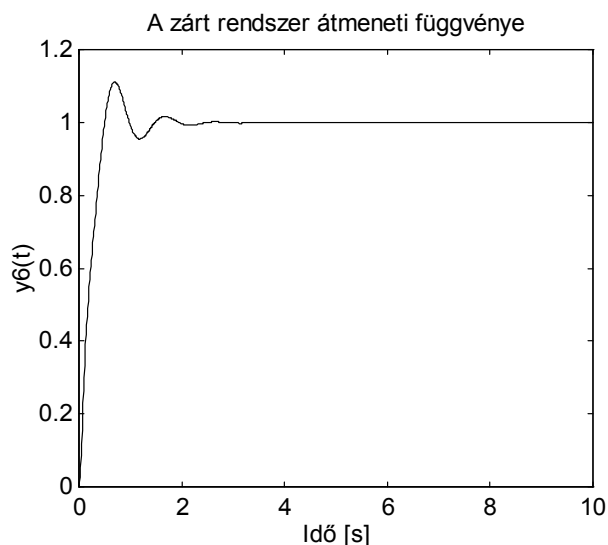
előírt értéket, tehát a súlyozó mátrixok elemeit hangolni szükséges. Több heurisztikus kísérlet után az alábbi mátrixokat alkalmaztam:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 20 \ 1]; \mathbf{R} = 1 \quad (15)$$

E súlyozó mátrixok esetén kiszámítottam az optimális állapot-visszacsatolási mátrixot, amely a következő:

$$\mathbf{K} = [-0,0308 \ 24,1071 \ -30,5224 \ -4,4336 \ -0,3523] \quad (16)$$

A 11. ábrán a zárt szabályozási rendszer egységugrás bemeneti jelre adott válaszfüggvényét láthatjuk, amely néhány előjelváltó lengés után rövid idő alatt (3 sec) válik konstans értékűvé.



11. ábra. A zárt rendszer átmeneti függvénye

Az időtartománybeli minőségi jellemzők számítása. Az eredményeket a 2 táblázatban foglaltam össze. A csillapítási tényező meglehetősen kicsi értékű, ami dinamikus folyamatra enged következtetni. A saját értékek rendelkeznek negatív valós résszel, amiből az következik, hogy a rendszer stabilis működésű.

Az időtartománybeli minőségi jellemzők számítása 2. táblázat

Sajátérték	Csillapítási tényező	Körfrekvencia [rad/s]
Hosszirányú mozgás — v = 150 km/h, H = 400 m, m = 135 kg		
-0,0487	1	0,0487
$-1,9242 \pm 6,4346 i$	0,2865	6,7162
$-14,8832 \pm 2,9845i$	0,9816	15,1621

KÖVETKEZTETÉSEK

Bemutattam a légköri turbulencia matematikai modelljeit, a MATLAB® beépített segédfüggvényeire alapozva létrehoztam egy sztochasztikus jelet, amellyel a SZOJKA-III típusú pilóta nélküli repülőeszközt, mint szabályozási rendszert gerjesztettem és vizsgáltam a rendszer válaszát. Az analízis fontosabb megállapításai a következők voltak:

- a nemirányított repülőgép minőségi jellemzői — a repülési magasság, a tömeg, és a repülési sebesség függvényében — széles határok között változhatnak;
- a valós fizikai környezet a repülőgép térbeli helyzetét érdemben befolyásolja;
- a repülőgép előírt minőségi jellemzőit az egyes repülési paraméterek szerint magvalósított állapot-visszacsatolások biztosítják;
- a szabályozók megtervezését szabályozástechnikai szoftverek segítik és támogatják.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Csáki, F. - Bars, R.: Automatika, Tankönyvkiadó, Bp, 1986.
- [2] McLean, Donald: Automatic Flight Control Systems, Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [3] MIL-F-8785C Flying and Handling Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [4] SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos-technikai adatai, IV. fejezet, Zelong instr., Brno, 1993.
- [5] Kis Andrea: Pilóta nélküli repülőgép automatikus repülésszabályozása, Szolnoki Tudományos Közlemények VI., Szolnok, 2002.
- [6] Pilóta nélküli repülőgépek fejlesztése a HTI-ben, Haditechnika, A Magyar Honvédség műszaki-tudományos és ismeretterjesztő folyóirata, 1997. különszám.
- [7] Szabolcsi, R. — Szegedi, P.: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki Tudományos Közlemények VI., Szolnok, 2002.
- [8] Pelikán, S.: Digitális számítógép vezérlésű repülőgépek repülésszabályozó rendszere, Tudományos Diákköri Dolgozat, ZMNE BJKMFK RMI Fedélzeti Rendszerek Tanszék, 2001.
- [9] Szabó, M.: Turbulencia és az orkáncsatornák jellemzői, hatásuk a repülésre, Szakdolgozat, Szolnok, 1989.
- [10] http://www.pmulcahy.com/czech_uavs.html

MELLÉKLET

Az analízishez használt számítógépes program

```
*****
clear
% *** Transfer Function of the Linear Filter ***
% *** Weather
a=0.051379869*[0 1 0.030420386]; b=[1 0.10537931 0.002776199];
% Generating Random Signal
dt=0.01; t=[0:999]*dt;
randn('seed',0)
in=rand(t);
plot(t,in,'w-'), xlabel('Idő [s]'), ylabel('bemenet(t)'),
title('A lineáris szűrő bemeneti jele')
pause, clf, close

% *** Determination of the Output Signal of the Filter ***
out=lsim(a,b,in,t); plot(t,out,'-w')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('kimenet(t)')
title('A lineáris szűrő kimeneti jele')
pause, clf, close

% *** FFT of the Output Signal ***
out1=fft(out); hz=[0:length(t)/2-1]/(length(t)*dt);
plot(hz,abs(out1(1:500)),'-w'), title('FFT of out(t)-Fourier')
pause, clg, close

% *** Determination of Autocorrelation Function ***
ruu=xcorr(out); tt=-flipud(t(2:1000)); tt=[tt;t];
plot(tt,ruu,'-w'), title('A kimeneti jel autokorrelációs függvénye(t)'),
ylabel('ruu(t)')
pause, clg, close

% *** PSD Function of the Output Signal ***
psdout=spectrum(out,1000); specplot(psdout,1/dt)
pause, clg, close

% *** Aircraft Transient Response Analysis ***
% *** Input of the Aircraft: Angular Deflection of the Elevator ***
% *** Output of the Aircraft: AoA ***
A=[-0.065 5.206 -9.81 0 0;
-0.011 -2.409 0 0 1;
```

```

0 0 0 0 1;
0 -41.667 41.677 0 0;
0.009 -13.032 0 0 -2.137];
B=[0 0 -0.065 -0.235 0;
0 0.853 -0.011 0 0.024;
0 0 0 0 0;
0 0 0 -1 0;
0 -18.586 0.009 0 0];
C=eye(5,5);
D=zeros(5,5);

% Determination of the impulse response of the aircraft
[Ar1,Br1,Cr1,Dr1]=ssselect(A,B,C,D,2,4);
y1=impz(Ar1,Br1,Cr1,Dr1,1,t); plot(t,y1,'-r'),grid
title('H(t) A nemirányított repülőgép súlyfüggvénye')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
pause, clg, close

% Determination of the response from vertical gust
y2=lsim(Ar1,Br1,Cr1,Dr1,out,t);
plot(t,y2,'-y'),grid
title('A nemirányított repülőgép H(t) függvénye szél esetén')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
pause, clg, close

% *** Determination of the Perturbed H(t) ***
y3=y1+y2; plot(t,y3,'-c'), grid
title('H(t) Szélcsendben'), xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
pause, clg, close

% *** Comparison of Behavior of the H(t) ***
plot(t,y1,'-w',t,y2,':w',t,y3,'--w'), grid
title('H(t) függvények közös nyomtatása')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
gtext('dirac')
gtext('szél esetén')
gtext('szélcsendben')
pause, clg, close

% Determination of the step response of the aircraft
y4=step(Ar1,Br1,Cr1,Dr1,1,t); plot(t,y4,'-r'),grid
title('A nemirányított repülőgép H(t) átmeneti függvénye')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
pause, clg, close
126

```

```

% *** Determination of the Perturbed H(t) ***
y5=y4+y2; plot(t,y5,'-c'), grid
title(' H(t) Szélcsendben'), xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
pause, clg, close

% *** Comparision of Behavior of the H(t) ***
plot(t,y4,'-w',t,y2,':w',t,y5,'--w'), grid
title('H(t) függvények közös nyomtatása')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('H(t) [m]')
gtext('1(t)')
gtext('szélcsend')
gtext('szél esetén')
pause, clg, close

% *** SISO Aircraft Dynamic Performances ***
damp(Ar1)
pause
pzmap(Ar1,Br1,Cr1,Dr1)
pause, clg, close

% *** Controller synthesis Using LQR Method
Q=[1 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 0 1]; R=1;
K=lqr(Ar1,Br1,Q,R)
pause

% *** Closing the loop (zárt szabályozási rendszer)***
%*** A zárt rendszer mátrixainak definiálása***
AA=Ar1-Br1*K;
BB=Br1*K(4);
CC=Cr1; DD=Dr1;
y6=step(AA,BB,CC,DD,1,t);
plot(t,y6,'-w')
title('A zárt rendszer átmeneti függvénye')
xlabel('Idő [s]'), ylabel('y6(t)')
pause, clg, close

%*** A zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzőinek számítása ***
damp(AA)
pause
pzmap(AA,BB,CC,DD)
pause, clg, close

```