

## A PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK IRÁNYÍTHATÓSÁGÁNAK ÉS MEGFIGYELHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

A pilótanélküli repülőgépek hasonlóan a hagyományos repülőgépekhez a háromdimenziós térben mozognak. Feladataikat előre programozottan, vagy valós időben távirányítva hajtják végre. Szabályozási rendszernek tekintve a repülőgépet az átviteli függvény és a súlyfüggvény csak akkor adja meg teljesen és helyesen a rendszer viselkedését, ha a rendszer irányítható és megfigyelhető [1]. Tehát, még az alkalmazás előtt fontos ismerni, hogy a repülőgép a rendelkezésre álló bemenő jelekkel (oldalkormány, hajtómű tolóerő, csűrő kormány, magassági kormány) vezérelve előre megtervezetten, az elvártaknak megfelelően fogja-e megvalósítani a kitűzött célt. A cikkben a Szojka-III pilótanélküli repülőgép — rendelkezésre álló matematikai modelljei alapján elvégzett — irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálatainak eredményei kerülnek bemutatásra. A vizsgálatok MATLAB környezetben futtatott, előre megírt program segítségével történtek. Az eredmények kiértékeléséhez a Kalman által 1961-ben bevezetett irányíthatóság és a megfigyelhetőség fogalma nyújt segítséget.

### AZ IRÁNYÍTHATÓSÁG ÉS MEGFIGYELHETŐSÉG

#### Az irányíthatóság

Ha egy előírt  $X_{(tv)}$  végállapot egy adott  $X_{(tk)}$  kezdeti állapotból  $u_{(t)}$  bemenő jel hatására elérhető, akkor az  $X_{(tk)}$  kezdeti állapotot a  $t_k$  kezdeti időpontban irányítható. Ha a  $t_k$  kezdeti időpontban minden  $X_{(tk)}$  állapot irányítható, akkor a rendszert  $t_k$  idő pillanatban irányítható. Ha ez  $t_k$  választásától független, akkor a rendszert teljesen irányíthatónak, röviden irányíthatónak nevezzük. Az ilyen rendszerben minden  $X_{(tk)}$  állapot minden  $t_k$  időpontban irányítható. [1, 2, 3] Azaz a pilóta nélküli repülőgép irányíthatóságának vizsgálatára azért van szükség, hogy egyértelműen eldönthető legyen, hogy a repülőgép bemenő jelével, vagy jeleivel valamennyi kívánt rendszerállapot változás véges idő alatt megva-

lósítható-e, illetve a kimenő jele tetszőlegesen befolyásolható-e. A Kalman féle rang feltétel kimondja, hogy az  $n$  dimenziós rendszer akkor állapot irányítható, ha az  $\mathbf{A}$  (állapot mátrix) és  $\mathbf{B}$  (bemeneti mátrix, amelyen keresztül a bemeneti jelek hatnak a rendszerre) mátrixból felépíthető  $\mathbf{C}_{contr}$  irányíthatósági mátrix, rangja  $n$  (amelynek determinánsa nem zérus).

$$\mathbf{C}_{contr} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Az irányíthatóság részben a rendszer pólusaitól és az azokhoz rendelhető állapotváltozók kapcsolatától ( $\mathbf{A}$ ), részben a az irányító bemenetek kijelölésétől ( $\mathbf{B}$ ) függ. [4, 5]

### A megfigyelhetőség

Az irányíthatósággal rokon fogalom a megfigyelhetőség, az irányíthatóság duális megfelelője. Az  $X_{(tk)}$  állapot a  $t_k$  időpontban megfigyelhető, ha adott  $u_{(t)}$  irányítóvektorhoz található egy (esetleg  $u_{(t)}$  menététől függő)  $t_v$  végidőpont oly módon, hogy  $u_{(t)}$  és  $v_{(t)} = g(x_{(t)}, u_{(t)}, t)$  kimeneti vektor lefolyásának ismerete a  $t_k \leq t \leq t_v$  tartományban  $X_{(tk)}$  meghatározásához elegendő. Ha minden  $X_{(tk)}$  állapot megfigyelhető a  $t_k$  időpillanatban, akkor a rendszer megfigyelhető a  $t_k$  időpontban. Ha minden  $X_{(tk)}$  állapot minden  $t_k$  időpontban megfigyelhető, akkor a rendszert teljesen megfigyelhetőnek, röviden megfigyelhetőnek nevezzük [1, 6].

Vagyis a megfigyelhetőség arra a kérdésre ad választ, hogy egy ismeretlen állapotú rendszer kimenő és bemenő jelének valamekkora ideig történő mérése után rekonstruálható-e a mérés kezdetén fennálló állapot. Vagyis, ha a kimenő jel nem tartalmaz információt az egyik állapotváltozóról a mérések eredményeiből nem tudunk visszakövetkeztetni az állapotváltozó értékére, változására. Tehát, ha az  $y$  kimenő jellel akarjuk a kezdeti állapotot előállítani, akkor a megfigyelhetőség a duális rendszer irányíthatósági feladatával lesz azonos, azaz megfordított hatásiránnyal vizsgálva a rendszer megfigyelhető, ha az  $\mathbf{O}_{obs}$  megfigyelhetőségi hipermátrix, rangja  $n$ .

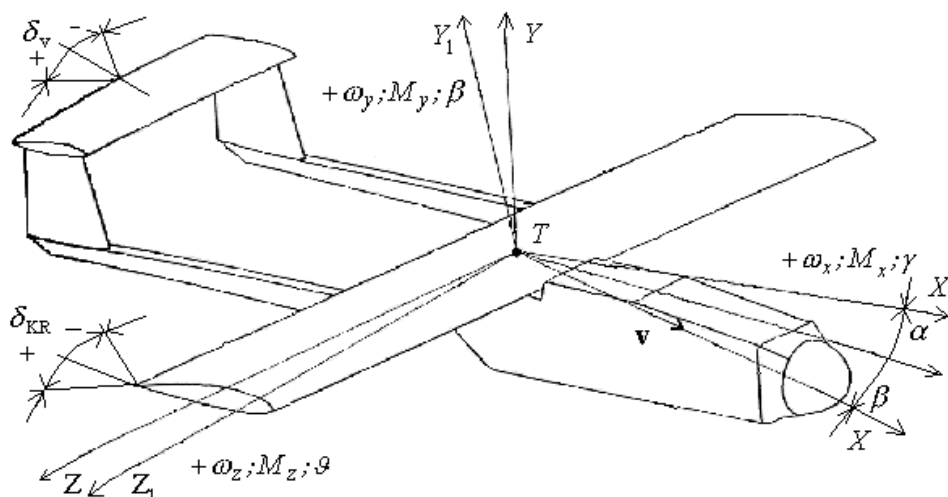
$$\mathbf{C}_0^T = \mathbf{O}_{obs} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T & \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T & \dots & [\mathbf{A}^T]^{n-1} \mathbf{C}^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

A megfigyelhetőség a rendszertől ( $\mathbf{A}$ ) és a kimenő jelek ( $\mathbf{C}$ ) kiválasztásától függ. [4]

# A SZOJKA-III PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉP IRÁNYÍTHATÓSÁGÁNAK ÉS MEGFIGYELHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

## A Szojka-III pilótánélküli repülőgép felépítése

A Szojka-III egy pilótánélküli merev szárnyú, kis méretű és súlyú elsősorban harcászati szintű felderítési feladatok megoldására alkalmas repülőeszköz (1. ábra).



1. ábra. A Szojka-III vázlata

Indítása rakétás startkatapult berendezés segítségével, indításról történik. A földi irányítóállomásról távirányítással vagy a robotpilótába előzetesen betöltött útvonalprogram alapján működtetik. Képes félautomata irányítással is repülni, amikor is bizonyos repülési paramétereket a robotpilóta stabilizál. A repülőgép alapvetően kis magasságokon (repülési tartománya 50-2.000 méter) alacsony repülési sebességgel (maximális sebessége 220 km/h) repül. Teljes feltöltéssel maximum 3,5 órát képes a levegőben tartózkodni, maximálisan 150 kilométeres távolságban. A leszállítása ejtőernyővel történik, de a törzsre szerelt siklótalpra is le tud szállni. [9]

A repülőgép a test-koordináta rendszer három tengelye körül kormányozható. A magassági kormány  $\delta_v$  szögkitérése által létesített nyomaték a repülőgép kereszt-tengely körüli bólintó mozgását, míg a csűrőlapok  $\delta_{KR}$  szögkitérése által létesített nyomaték a repülőgép hossz-tengely körül orsózó mozgását hozza létre. A repülőgép több irányítási csatornával nem rendelkezik, mivel a hajtómű üzemállapota repülés közben nem változtatható és az oldalkormány nem került kiépítésre [7, 8].

## A PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉP IRÁNYÍTHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A vizsgálat az állandó tömegű, állandó magasságon, 110 és 190 km/h közötti sebességgel repülő repülőgépre terjedt ki. Az üzemmódok paraméterei, egyenletei a mellékletben találhatóak.

| üzemmód |                            | Irányíthatósági mátrix   | Irányítható- | Irányítható-e? |
|---------|----------------------------|--|--------------|----------------|
| 1       | Oldal-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont1} = \begin{bmatrix} -25.9 & 98.3 & -230.7 & 644.9 & -251.58 \\ -4 & -3.8 & 40.3 & -71.1 & 63 \\ 0 & -7.8 & 4.5 & 36.4 & -58 \\ 0 & 25.9 & 98.3 & -230.7 & 644.9 \\ 0 & -4 & -3.8 & 40.3 & -71.1 \end{bmatrix}$  | 5            | Igen           |
|         | Hossz-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 3.2 & 0 & 418 & 0 & 444 & 0 & -5767 \\ 0 & 0.6 & 0 & -111 & 0 & 309 & 0 & 43 & 0 & -3189 \\ 0 & 0 & 0 & -10 & 0 & 113 & 0 & 601 & 0 & -3104 \\ 0 & 0 & 0 & -191 & 0 & 339 & 0 & 606 & 0 & 1708 \\ 0 & -10 & 0 & 113 & 0 & 601 & 0 & -3104 & 0 & 4568 \end{bmatrix}$ | 5            | Igen           |
| 2       | Oldal-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont3} = \begin{bmatrix} -362 & 1612 & -4884 & 17726 & -78582 \\ -7.1 & 3.1 & 644 & -1244 & 1319 \\ 0 & -106 & 5.7 & 592 & -1024 \\ 0 & -362 & 1612 & -4884 & 17726 \\ 0 & -7.1 & 3.1 & 644 & -1244 \end{bmatrix}$   | 5            | Igen           |
|         | Hossz-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 3.8 & 0 & 564 & 0 & 779 & 0 & -1105 \\ 0 & 0.7 & 0 & -155 & 0 & 51 & 0 & 98 & 0 & -737 \\ 0 & 0 & 0 & -14 & 0 & 186 & 0 & 113 & 0 & -716 \\ 0 & 0 & 0 & -267 & 0 & 558 & 0 & -1168 & 0 & 3880 \\ 0 & -14 & 0 & 186 & 0 & 1173 & 0 & -7156 & 0 & 1230 \end{bmatrix}$ | 5            | Igen           |

|   |                            |   |   |      |
|---|----------------------------|---|---|------|
| 3 | Oldal-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont5} = \begin{bmatrix} -48 & 247 & -883 & 3816 & -19415 \\ -12 & -1 & 104 & -204 & 135 \\ 0 & -15 & 8 & 103 & -202 \\ 0 & -48 & 247 & -883 & 3816 \\ 0 & -12 & -1 & 104 & -204 \end{bmatrix}$   | 5 | Igen |
|   | Hossz-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 44 & 0 & 746 & 0 & 1221 & 0 & -1951 \\ 0 & 0.9 & 0 & -206 & 0 & 783 & 0 & 185 & 0 & -1501 \\ 0 & 0 & 0 & -186 & 0 & 286 & 0 & 2079 & 0 & -1464 \\ 0 & 0 & 0 & -355 & 0 & 856 & 0 & -2070 & 0 & 7891 \\ 0 & -186 & 0 & 286 & 0 & 2079 & 0 & -1464 & 0 & 2888 \end{bmatrix}$ | 5 | Igen |
| 4 | Oldal-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont7} = \begin{bmatrix} -62 & 359 & -1417 & 7410 & -4319 \\ -19 & -17 & 163 & -50 & -237 \\ 0 & -22 & -6 & 181 & -102 \\ 0 & -62 & 359 & -1417 & 7410 \\ 0 & -19 & -17 & 163 & -50 \end{bmatrix}$  | 5 | Igen |
|   | Hossz-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 95 & 0 & 182 & 0 & -3212 \\ 0 & 1 & 0 & -27 & 0 & 114 & 0 & 32 & 0 & -2824 \\ 0 & 0 & 0 & -24 & 0 & 42 & 0 & 343 & 0 & -2736 \\ 0 & 0 & 0 & -46 & 0 & 125 & 0 & 3412 & 0 & 14704 \\ 0 & -24 & 0 & 42 & 0 & 343 & 0 & -2736 & 0 & 6100 \end{bmatrix}$               | 5 | Igen |
| 5 | Oldal-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont9} = \begin{bmatrix} -77 & 501 & -2201 & 12176 & -79227 \\ -29 & 8 & 278 & -518 & -760 \\ 0 & -31 & 20 & 303 & -726 \\ 0 & -77 & 501 & -2201 & 12176 \\ 0 & -29 & 8 & 278 & -518 \end{bmatrix}$   | 5 | Igen |
|   | Hossz-<br>irányú<br>mozgás | $C_{cont10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 119 & 0 & 254 & 0 & -5007 \\ 0 & 1 & 0 & -33 & 0 & 159 & 0 & 50 & 0 & -4926 \\ 0 & 0 & 0 & -30 & 0 & 58 & 0 & 535 & 0 & -4772 \\ 0 & 0 & 0 & -57 & 0 & 174 & 0 & -5323 & 0 & 25611 \\ 0 & -30 & 0 & 58 & 0 & 535 & 0 & -4772 & 0 & 11879 \end{bmatrix}$           | 5 | Igen |

## A PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉP MEGFIGYELHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

A megfigyelhetőségi vizsgálat az állandó tömegű, állandó magasságon, 110 és 190 km/h közötti sebességgel repülő repülőgépre terjedt ki.

A **C** kimeneti mátrix minden esetben egy 5x5-ös egység (mindent áteresztő) mátrix. Az üzemmódok paraméterei, egyenletei a mellékletben található.

1. Üzem mód

Oldalirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -3.441 & -2.292 & -12.63 & 0 & 0 \\ 0.199 & -0.351 & -2.481 & 0 & 0 \\ 0.149 & 1 & -0.244 & 0.321 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 9.5025 & -3.9387 & 52.228 & -4.0542 & 0 \\ -1.1243 & -2.8139 & -1.0372 & -0.7964 & 0 \\ -0.0291 & -0.9365 & -4.3033 & -0.0783 & 0 \\ -3.441 & -2.292 & -12.63 & 0 & 0 \\ 0.199 & -0.351 & -2.481 & 0 & 0 \\ -29.7542 & 31.8308 & -122.9882 & 16.7652 & 0 \\ 2.3577 & 2.5273 & 21.434 & -0.3329 & 0 \\ -0.8059 & -3.908 & 3.7406 & -1.3814 & 0 \\ 9.5025 & -3.9387 & 52.228 & -4.0542 & 0 \\ -1.1243 & -2.8139 & -1.0372 & -0.7964 & 0 \\ 107.1584 & -65.9643 & 326.8323 & -39.4792 & 0 \\ -4.7493 & 15.143 & -41.2784 & 6.8803 & 0 \\ 1.1713 & 6.9594 & 18.9612 & 1.2007 & 0 \\ -29.7542 & 31.8308 & -122.9882 & 16.7652 & 0 \\ 2.3577 & 2.5273 & 21.434 & -0.3329 & 0 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

Hosszirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.067 & 5.14 & -9.91 & 0 & 0 \\ -0.021 & -1.776 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -30.556 & 30.556 & 0 & 0 \\ 0.012 & -7.003 & 0 & 0 & -1.567 \\ -0.1035 & -9.473 & 0.664 & 0 & -4.77 \\ 0.0507 & -3.9568 & 0.2081 & 0 & -3.343 \\ 0.012 & -7.003 & 0 & 0 & -1.567 \\ 0.6417 & 54.2675 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1275 & 23.4727 & -0.1189 & 0 & -4.5475 \\ 0.1486 & 49.6967 & 1.0252 & 0 & -1.3345 \\ 0.0396 & 30.6989 & -0.5025 & 0 & 1.4898 \\ 0.1275 & 23.4727 & -0.1189 & 0 & -4.5475 \\ -1.1826 & -93.0808 & -6.359 & 0 & 54.2675 \\ -0.556 & -9.1862 & -1.2631 & 0 & 30.4797 \\ -1.0696 & -78.1521 & -1.4729 & 0 & 52.813 \\ -0.6294 & -64.751 & -0.3922 & 0 & 27.8618 \\ -0.556 & -9.1862 & -1.2631 & 0 & 30.4797 \\ 2.6851 & -220.8021 & 11.7197 & 0 & -184.4769 \\ 0.5959 & -199.993 & 5.5103 & 0 & -58.211 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

## 2. Üzem mód

Oldalirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.066 & -1.964 & -15.118 & 0 & 0 \\ 0.163 & -0.387 & -3.465 & 0 & 0 \\ 0.097 & 1 & -0.289 & 0.272 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 14.7458 & -6.3723 & 72.6441 & -4.1121 & 0 \\ -1.0619 & -3.6354 & -0.1219 & -0.9425 & 0 \\ 0.0126 & -0.8665 & -4.8479 & -0.0786 & 0 \\ -4.066 & -1.964 & -15.118 & 0 & 0 \\ 0.163 & -0.387 & -3.465 & 0 & 0 \\ -58.0606 & 46.1495 & -221.8408 & 19.7592 & 0 \\ 2.771 & 3.3706 & 28.6862 & -0.0332 & 0 \\ -0.7412 & -4.5373 & 4.2135 & -1.3186 & 0 \\ 14.7458 & -6.3723 & 72.6441 & -4.1121 & 0 \\ -1.0619 & -3.6354 & -0.1219 & -0.9425 & 0 \\ 241.8376 & -125.6696 & 781.9645 & -60.3407 & 0 \\ -7.968 & 21.9396 & -61.8615 & -7.8027 & 0 \\ 1.3642 & 7.4252 & 25.7092 & 1.1461 & 0 \\ -58.0606 & 46.1495 & -221.8408 & 19.7592 & 0 \\ 2.771 & 3.3706 & 28.6862 & -0.0332 & 0 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

Hosszirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.064 & 5.182 & -9.81 & 0 & 0 \\ -0.015 & -2.091 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -36.111 & 36.111 & 0 & 0 \\ 0.01 & -9.786 & 0 & 0 & -1.852 \\ -0.0736 & -11.1672 & 0.6278 & 0 & -4.628 \\ 0.0423 & -5.4914 & 0.1472 & 0 & -3.943 \\ 0.01 & -9.786 & 0 & 0 & -1.852 \\ 0.5417 & 75.5081 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1276 & 38.638 & -0.0981 & 0 & -6.3561 \\ 0.1259 & 68.2587 & 0.7223 & 0 & -1.9683 \\ 0.0402 & 50.2881 & -0.4152 & 0 & 1.9581 \\ 0.1276 & 38.638 & -0.0981 & 0 & -6.3561 \\ -1.1673 & -155.0805 & -5.3137 & 0 & 75.5081 \\ -0.6513 & -17.93 & -1.2521 & 0 & 50.3114 \\ -1.0516 & -122.8143 & -1.2355 & 0 & 72.6263 \\ -0.7373 & -124.1064 & -0.3947 & 0 & 46.2465 \\ -0.6513 & -17.93 & -1.2521 & 0 & 50.3114 \\ 3.156 & -420.6978 & 11.4511 & 0 & -300.2353 \\ 0.8137 & -458.2309 & 6.3892 & 0 & -112.3587 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

### 3. Üzem mód

Oldalirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.7 & -1.7 & -18 & 0 & 0 \\ 0.1 & -0.4 & -4.6 & 0 & 0 \\ 0.1 & 1 & -0.3 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 20.6 & -9.2 & 98.5 & -4.2 & 0 \\ -1 & -4.7 & 1.1 & -1.1 & 0 \\ 0.1 & -0.9 & -0.57 & -0.1 & 0 \\ -4.7 & -1.7 & -18 & 0 & 0 \\ 0.1 & -0.4 & -4.6 & 0 & 0 \\ -96 & 66.9 & -362.2 & 23.2 & 0 \\ 3 & 4.8 & 39.1 & 0.3 & 0 \\ -0.8 & -5.4 & 5 & -1.3 & 0 \\ 20.6 & -9.2 & 98.5 & -4.2 & 0 \\ -1 & -4.7 & 1.1 & -1.1 & 0 \\ 459.4 & -225.4 & 1541.4 & -85.1 & 0 \\ -10.8 & 31.8 & -89.7 & 9.2 & 0 \\ 2 & 8.7 & 37.4 & 1.2 & 0 \\ -96 & 66.9 & -362.2 & 23.2 & 0 \\ 3 & 4.8 & 39.1 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

Hosszirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.065 & 5.206 & -9.81 & 0 & 0 \\ -0.011 & -2.409 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -41.667 & 41.667 & 0 & 0 \\ 0.009 & -13.032 & 0 & 0 & -2.137 \\ -0.053 & -12.8796 & 0.6377 & 0 & -4.6040 \\ 0.0362 & -7.286 & 0.1079 & 0 & -4.546 \\ 0.009 & -13.032 & 0 & 0 & -2.137 \\ 0.4583 & 100.3758 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1235 & 59.2903 & -0.0883 & 0 & -8.4652 \\ 0.1037 & 90.7503 & 0.5203 & 0 & -2.4032 \\ 0.0369 & 76.9839 & -0.3553 & 0 & 2.5367 \\ 0.1235 & 59.2903 & -0.0883 & 0 & -8.4652 \\ -1.1339 & -239.4192 & -4.4963 & 0 & 100.3758 \\ -0.7364 & -31.8684 & -1.2119 & 0 & 77.2922 \\ -1.0266 & -186.7585 & -1.0172 & 0 & 96.4063 \\ -0.8264 & -218.321 & -0.3618 & 0 & 71.2077 \\ -0.7364 & -31.8684 & -1.2119 & 0 & 77.2922 \\ 3.6107 & -737.2398 & 11.1238 & 0 & -458.4186 \\ 1.094 & -934.3352 & 7.2242 & 0 & -198.2538 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

#### 4. Üzem mód

Oldalirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs7} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -5.3 & -1.5 & -21.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & -5.9 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -0.4 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 27.2 & -13.8 & 130.7 & -4.4 & 0 \\ -0.8 & -5.9 & -3.1 & -1.2 & 0 \\ 0.1 & 0 & -6.7 & -0.1 & 0 \\ -5.3 & -1.5 & -21.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & -5.9 & 0 & 0 \\ -145.2 & 81.9 & -547.9 & 27.2 & 0 \\ 2.3 & -4.7 & 53.2 & -0.6 & 0 \\ -0.8 & -6.8 & 0.5 & -1.4 & 0 \\ 27.2 & -13.8 & 130.7 & -4.4 & 0 \\ -0.8 & -5.9 & -3.1 & -1.2 & 0 \\ 786 & -283.4 & 2820.9 & -114 & 0 \\ -11 & 47.5 & -40.7 & 11.1 & 0 \\ 2.1 & -1.6 & 57.2 & 0.1 & 0 \\ -145.2 & 81.9 & -547.9 & 27.2 & 0 \\ 2.3 & -4.7 & 53.2 & -0.6 & 0 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

Hosszirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs8} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.1 & 5.2 & -9.8 & 0 & 0 \\ 0 & -2.7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -47.2 & 47.2 & 0 & 0 \\ 0 & -16.7 & 0 & 0 & -2.4 \\ 0 & -14.7 & 0.7 & 0 & -4.6 \\ 0 & -9.4 & 0.1 & 0 & -5.1 \\ 0 & -16.7 & 0 & 0 & -2.4 \\ 0.4 & 128.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 86.2 & -0.1 & 0 & -10.9 \\ 0.1 & 116.2 & 0.4 & 0 & -2.9 \\ 0 & 111.9 & -0.3 & 0 & 3.2 \\ 0.1 & 86.2 & -0.1 & 0 & -10.9 \\ -1.2 & -348.9 & -4.2 & 0 & 128.8 \\ -0.9 & -52.5 & -1.3 & 0 & 112.5 \\ -1.1 & -267.4 & -1 & 0 & 123.7 \\ -1 & -358.6 & -0.4 & 0 & 103.8 \\ -0.9 & -52.5 & -1.3 & 0 & 112.5 \\ 4.3 & -1210.4 & 11.7 & 0 & -665 \\ 1.4 & -1744.7 & 8.6 & 0 & -326.2 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

## 5. Üzem mód

Oldalirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs9} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -5.9 & -1.4 & -25.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & -0.5 & -7.4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -0.4 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 34.5 & -15.9 & 170 & -4.7 & 0 \\ -0.8 & -7.3 & 4.6 & -1.4 & 0 \\ 0.1 & -1 & -7.9 & -0.1 & 0 \\ -5.9 & -1.4 & -25.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & -0.5 & -7.4 & 0 & 0 \\ -206.7 & 129.8 & -818.9 & 31.6 & 0 \\ 3 & 9.7 & 72.9 & 0.9 & 0 \\ -1.1 & -7.5 & 7.9 & -1.5 & 0 \\ 34.5 & -15.9 & 17 & -4.7 & 0 \\ -0.8 & -7.3 & 4.6 & -1.4 & 0 \\ 1250.8 & -596.5 & 4566.9 & -152.3 & 0 \\ -14.2 & 63.4 & -178.3 & 13.6 & 0 \\ 4.3 & 13.4 & 79.1 & 1.5 & 0 \\ -206.7 & 129.8 & -818.9 & 31.6 & 0 \\ 3 & 9.7 & 72.9 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

Hosszirányú mozgás:

A megfigyelhetőségi mátrix

$$O_{obs10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.1 & 5.2 & -9.8 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -52.8 & 52.8 & 0 & 0 \\ 0 & -20.9 & 0 & 0 & -2.7 \\ 0 & -16.4 & 0.7 & 0 & -4.6 \\ 0 & -11.7 & 0.1 & 0 & -5.8 \\ 0 & -20.9 & 0 & 0 & -2.7 \\ 0.4 & 160.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 120.4 & -0.1 & 0 & -13.6 \\ 0.1 & 145.2 & 0.3 & 0 & -3.3 \\ 0 & 156 & -0.3 & 0 & 4 \\ 0.1 & 120.4 & -0.1 & 0 & -13.6 \\ -1.2 & -488.1 & -3.6 & 0 & 160.8 \\ -0.9 & -82 & -1.2 & 0 & 157.1 \\ -1 & -374 & -0.8 & 0 & 154.4 \\ -1.1 & -558.4 & -0.4 & 0 & 145 \\ -0.9 & -82 & -1.2 & 0 & 157.1 \\ 4.6 & -1881.9 & 11.3 & 0 & -927 \\ 1.7 & -3039.7 & 9.3 & 0 & -508.4 \end{bmatrix}$$

a mátrix rangja=5, megfigyelhető

## KÖVETKEZTETÉSEK

A Kalman féle rang feltétel alapján elmondható:

- a repülőgép összes vizsgált állapota a rendelkezésre álló bemeneti paraméterrel irányítható;
- az összes állapotváltozója megfigyelhető.

A Szojka-III pilótánélküli repülőgép a kiépítésre került kormányzerveivel (csűrő, magassági kormány) előre meghatározott térbeli mozgásra képes. A repülőgép térbeli mozgásának jellemzői ( $v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) változása visszavezethető a kormányfelületek mozgása által keltett nyomatékváltozásokra.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Csáki Frigyes: Irányítástechnikai Kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [2] Dr. Csáki Frigyes – Bars Ruth: Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.
- [3] Csáki Frigyes: Korszerű Szabályozáselmélet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- [4] Dr. Tuschák Róbert: Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, 1994.
- [5] McLean, D.: Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, International Ltd, 1990.
- [6] Dr. Csáki Frigyes Fejezetek a szabályozástechnikából Állapotegyenletek, Műszaki Könyvkiadó, 1973.
- [7] SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.
- [8] Szabolcsi Róbert—Szegedi Péter: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki tudományos konferencia MTESZ, Szolnok 2002. nov. 06. (CD-ROM).
- [9] Pilóta nélküli felderítő repülő eszközök. Haditechnikai Intézet, Haditechnika füzetek 1. sz. 1999.

## MELLÉKLET

### A Szojka-III matematikai modelljei a vizsgált üzemmódokon

Az irányíthatósági vizsgálatnál felhasznált paraméterek, egyenletek

1. Üzem mód Kiindulási adatok:  $v = 110 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A_1 x_1 + B_1 u_1 + \Gamma_1 w_1 = \begin{bmatrix} -3,441 & -2,292 & -12,63 & 0 & 0 \\ 0,199 & -0,351 & -2,481 & 0 & 0 \\ 0,149 & 1 & -0,244 & 0,321 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} + (1)$$

$$+ [-25,919 \quad -3,967 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \delta_{cs} + [0 \quad 0 \quad 0,033 \quad 0 \quad 0]^T \cdot w_z$$

A hosszirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\alpha} \\ \dot{H} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = A_2 x_2 + B_2 u_2 + \Gamma_2 w_2 = \begin{bmatrix} -0,067 & 5,14 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,021 & -1,776 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -30,556 & 30,556 & 0 & 0 \\ 0,012 & -7,003 & 0 & 0 & -1,567 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ \alpha \\ H \\ \omega_z \end{bmatrix} + (2)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,625 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -9,995 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_p \\ \delta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,067 & -0,321 & 0 \\ -0,021 & 0 & 0,033 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0,012 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_y \end{bmatrix}$$

2. Üzem mód Kiindulási adatok:  $v = 130 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A_3 x_1 + B_3 u_1 + \Gamma_3 w_1 = \begin{bmatrix} -4,066 & -1,964 & -15,118 & 0 & 0 \\ 0,163 & -0,387 & -3,465 & 0 & 0 \\ 0,097 & 1 & -0,289 & 0,272 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} + (3)$$

$$+ [-36,201 \quad -7,134 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \delta_{cs} + [0 \quad 0 \quad 0,028 \quad 0 \quad 0]^T \cdot w_z$$

A hosszirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\alpha} \\ \dot{H} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = A_4 x_2 + B_4 u_2 + \Gamma_4 w_2 = \begin{bmatrix} -0,064 & 5,182 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,015 & -2,091 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -36,111 & 36,111 & 0 & 0 \\ 0,010 & -9,786 & 0 & 0 & -1,852 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ \alpha \\ H \\ \omega_z \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,739 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -13,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_p \\ \delta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,064 & -0,272 & 0 \\ -0,015 & 0 & 0,028 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ \dot{w}_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

3. Üzem mód Kiindulási adatok:  $v = 150 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A_5 x_1 + B_5 u_1 + \Gamma_5 w_1 = \begin{bmatrix} -4,692 & -1,727 & -18,021 & 0 & 0 \\ 0,137 & -0,433 & -4,613 & 0 & 0 \\ 0,064 & 1 & -0,333 & 0,235 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} + \\ + [-48,196 \quad -12,089 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \delta_{cx} + [0 \quad 0 \quad 0,024 \quad 0 \quad 0]^T \cdot w_z \end{aligned} \quad (5)$$

A hosszirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\alpha} \\ \dot{H} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = A_6 x_2 + B_6 u_2 + \Gamma_6 w_2 = \begin{bmatrix} -0,065 & 5,206 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,011 & -2,409 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -41,667 & 41,667 & 0 & 0 \\ 0,009 & -13,032 & 0 & 0 & -2,137 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ \alpha \\ H \\ \omega_z \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,853 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -18,586 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_p \\ \delta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,065 & -0,235 & 0 \\ -0,011 & 0 & 0,024 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0,009 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ \dot{w}_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

4. Üzem mód Kiindulási adatok:  $v = 170 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A_7 x_1 + B_7 u_1 + \Gamma_7 w_1 = \begin{bmatrix} -5,318 & -1,549 & -21,339 & 0 & 0 \\ 0,116 & 0,483 & -5,926 & 0 & 0 \\ 0,042 & 1 & -0,378 & 0,208 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} + (7)$$

$$+ [-61,905 \quad -19,3 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \delta_{cs} + [0 \quad 0 \quad 0,021 \quad 0 \quad 0]^T \cdot w_z$$

A hosszirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\Theta} \\ \dot{H} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = A_8 x_2 + B_8 u_2 + \Gamma_8 w_2 = \begin{bmatrix} -0,069 & 5,244 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,009 & -2,727 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -47,222 & 47,222 & 0 & 0 \\ 0,008 & -16,740 & 0 & 0 & -2,422 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ \alpha \\ \Theta \\ H \\ \omega_z \end{bmatrix} + (8)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,967 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -23,872 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_p \\ \delta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,069 & -0,208 & 0 \\ -0,009 & 0 & 0,021 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0,008 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ \dot{w}_y \end{bmatrix}$$

5. Üzem mód Kiindulási adatok:  $v = 190 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A_9 x_1 + B_9 u_1 + \Gamma_9 w_1 = \begin{bmatrix} -5,943 & -1,412 & -25,072 & 0 & 0 \\ 0,099 & -0,535 & -7,402 & 0 & 0 \\ 0,027 & 1 & -0,422 & 0,186 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} + (9)$$

$$+ [-77,328 \quad -29,324 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \delta_{cs} + [0 \quad 0 \quad 0,019 \quad 0 \quad 0]^T \cdot w_z$$

A hosszirányú mozgás állapotegyenlete:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \alpha \\ \dot{\Theta} \\ \dot{H} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} &= \mathbf{A}_{10} \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_{10} \mathbf{u}_2 + \mathbf{\Gamma}_{10} \mathbf{w}_2 = \begin{bmatrix} -0,074 & 5,24 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,007 & -3,047 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -52,778 & 52,778 & 0 & 0 \\ 0,007 & -20,912 & 0 & 0 & -2,707 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ \alpha \\ \Theta \\ H \\ \omega_z \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1,08 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -29,82 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_p \\ \delta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,074 & -0,186 & 0 \\ -0,007 & 0 & 0,019 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0,007 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ \dot{w}_y \end{bmatrix} \quad (10)
\end{aligned}$$

A megfigyelhetőségi vizsgálatnál felhasznált paraméterek, egyenletek

1. Kiindulási adatok:  $v = 110 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -3,441 & -2,292 & -12,63 & 0 & 0 \\ 0,199 & -0,351 & -2,481 & 0 & 0 \\ 0,149 & 1 & -0,244 & 0,321 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A hosszirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -0,067 & 5,14 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,021 & -1,776 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -30,556 & 30,556 & 0 & 0 \\ 0,012 & -7,003 & 0 & 0 & -1,567 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2. Kiindulási adatok:  $v = 130 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -4,066 & -1,964 & -15,118 & 0 & 0 \\ 0,163 & -0,387 & -3,465 & 0 & 0 \\ 0,097 & 1 & -0,289 & 0,272 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

A hosszirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_4 = \begin{bmatrix} -0,064 & 5,182 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,015 & -2,091 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -36,111 & 36,111 & 0 & 0 \\ 0,010 & -9,786 & 0 & 0 & -1,852 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3. Kiindulási adatok:  $v = 150 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_5 = \begin{bmatrix} -4,692 & -1,727 & -18,021 & 0 & 0 \\ 0,137 & -0,433 & -4,613 & 0 & 0 \\ 0,064 & 1 & -0,333 & 0,235 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A hosszirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_6 = \begin{bmatrix} -0,065 & 5,206 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,011 & -2,409 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -41,667 & 41,667 & 0 & 0 \\ 0,009 & -13,032 & 0 & 0 & -2,137 \end{bmatrix} \quad (16)$$

4. Kiindulási adatok:  $v = 170 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_7 = \begin{bmatrix} -5,318 & -1,549 & -21,339 & 0 & 0 \\ 0,116 & 0,483 & -5,926 & 0 & 0 \\ 0,042 & 1 & -0,378 & 0,208 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

A hosszirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_g = \begin{bmatrix} -0,069 & 5,244 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,009 & -2,727 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -47,222 & 47,222 & 0 & 0 \\ 0,008 & -16,740 & 0 & 0 & -2,422 \end{bmatrix} \quad (18)$$

5. Kiindulási adatok:  $v = 190 \text{ km/h}$ ,  $H = 400 \text{ m}$ ,  $m = 135 \text{ kg}$

Az oldalirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_y = \begin{bmatrix} -5,943 & -1,412 & -25,072 & 0 & 0 \\ 0,099 & -0,535 & -7,402 & 0 & 0 \\ 0,027 & 1 & -0,422 & 0,186 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A hosszirányú mozgás rendszer mátrixa:

$$A_{10} = \begin{bmatrix} -0,074 & 5,24 & -9,81 & 0 & 0 \\ -0,007 & -3,047 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -52,778 & 52,778 & 0 & 0 \\ 0,007 & -20,912 & 0 & 0 & -2,707 \end{bmatrix} \quad (20)$$