Dr. Gausz Tamás

HELIKOPTER ROTORLAPÁTOK MOZGÁSA NEM ÁLLANDÓ SEBESSÉGŰ REPÜLÉS ESETÉN

A helikopterek rotorlapátjai repülés közben bonyolult mozgásokat végeznek. Legelsőként említendő a repülésből következő haladó mozgás és a rotortengely forgása miatti forgó mozgás. Alapvető mozgásforma még a csapkodó, a matató és a kormányzás miatti lapáttengely körüli forgó mozgás. Ezek a merev rotorlapát mozgásformái. A rotorlapát rugalmassága miatt jöhet és jön létre a lapátok hajlító és csavaró lengése. Végeredményben egy rotorlapátnak a felsorolt mozgásformáknak megfelelően, sok szabadságfoka lehet. E cikkben főként azokat a hatásokat vizsgáljuk, amelyeket a helikopter törzsének forgó mozgása a rotorlapát mozgására gyakorol. Éppen ezért egyszerű dinamikai és aerodinamikai modellt választottunk. A dinamikai modell a repülés miatti haladó és a főtengely forgása miatt előálló forgó mozgáson túl csak a merev rotorlapát csapkodó és hossztengelye körüli forgó mozgását foglalja magában. Az aerodinamikai modellben a legegyszerűbb, háromszög indukált sebesség eloszlást alkalmaztuk.

Ennek a vizsgálatnak az elvégzése érdekében kialakítunk egy általános, aerodinamikai-dinamikai modellt. Ennek a modellnek, a sok egyszerűsítés ellenére, nincs zárt alakú megoldása. Ezért a konkrét vizsgálatot egy konkrét helikopter típus, az MD 500-as helikopter adatainak felhasználásával végezzük el. Az ilyen, adott helikopterre vonatkozó vizsgálat nyilvánvalóan korlátozza az általánosságot. Véleményünk szerint a kapott eredményeket ezzel együtt jellemzőnek tekinthetjük, illetve adott esetben a számítás más típusokra megismételhető.

AZ AERODINAMIKAI MODELL

A bevezetőben leírtak szerint a vizsgálatban a legegyszerűbb, háromszög indukált sebesség eloszlást alkalmazzuk. Ennek kifejezése:

$$v_i\left(x_l\,,\psi_r\right)=v_{i0}\left[1+K\left(\frac{e+x_l}{R}\right)\cos\psi_r\right]; \qquad (1)$$

ahol: x_l - a rotorlapát hossza mentén mért távolság (1. ábra);
ψ_r - az azimút szög (1. ábra);
K - állandó, értéke jelen számításban 0.8.

E cikkben, minden számítási esetben ezt a modellt alkalmazzuk, mert így az aerodinamikai modell a rotorlapát mozgásokra nem gyakorol közvetlen befolyást. Természetesen ez a modell több irányban is továbbfejleszthető. A következő vizsgálatainkban olyan aerodinamikai modellt alkalmazunk majd, amely a légerőket a rotorlapát geometriájának és mozgásállapotának megfelelően szolgáltatja.

A KOORDINÁTA RENDSZEREK

Az alkalmazott koordináta rendszereket az 1. ábrán tüntettük fel. A helikopter mozgását a helikopter törzséhez rögzített koordináta rendszerben $(x \;\; y \;\; z)$ adjuk meg. A merevnek tekintett rotorlapát mozgását a pedig lapáthoz rögzített koordináta rendszerben vizsgáljuk. Ez az $(x_t \;\; y_t \;\; z_t)$ rendszer. Az 1-es ábrán szerepel még a rotorhoz kötött, nem forgó koordináta rendszer $(x_r \;\; y_r \;\; z_r)$; a rotorral együtt forgó koordináta rendszer $(x_f \;\; y_f \;\; z_f)$ és a lapát hossztengelyéhez kötött, de a lapáttal nem forgó koordináta rendszer $(x_l \;\; y_l \;\; z_l)$. Az első és második koordináta rendszer után említett, további koordináta rendszerek az átszámítások miatt szükségesek.

A közös origójú a koordináta rendszerek közötti kapcsolat egy-egy forgatási mátrixszal jellemezhető. Különböző origó esetén eltolást kell alkalmazni. Az elforgatásokat a következő mátrixokkal írhatjuk le:

$$\mathbf{r}_r = \mathbf{D}\,\mathbf{r}\,; \tag{2}$$

$$\mathbf{r}_f = \mathbf{H}\,\mathbf{r}_r\,; \tag{3}$$

$$\mathbf{r}_l = \mathbf{G}\,\mathbf{r}_f\,; \tag{4}$$

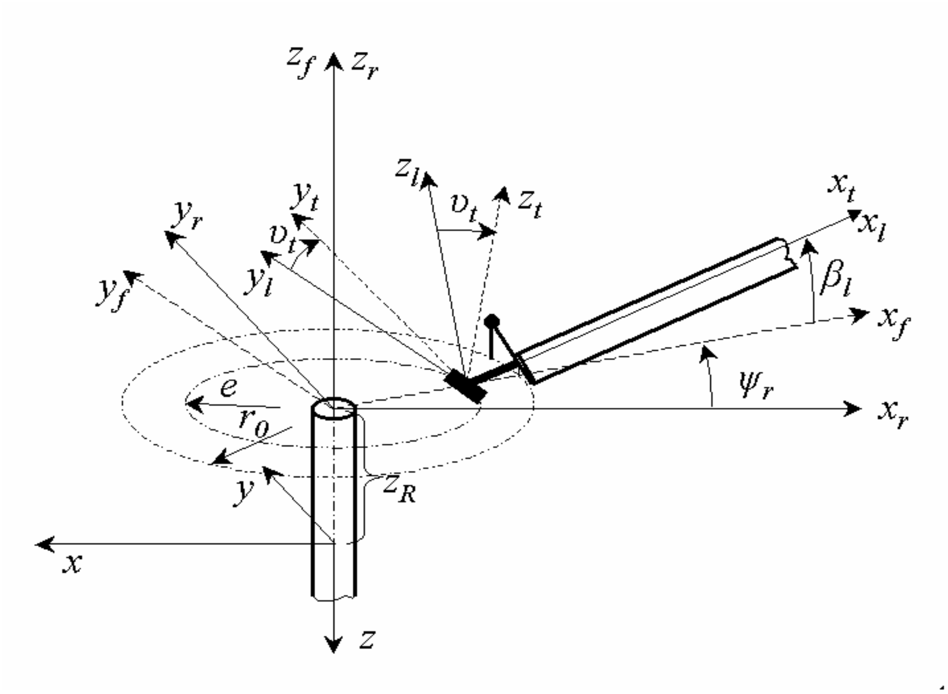
$$\mathbf{r}_t = \mathbf{M}\,\mathbf{r}_l\,; \tag{5}$$

ahol:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \qquad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos\psi_r & \sin\psi_r & 0 \\ -\sin\psi_r & \cos\psi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos\beta_l & 0 & -\sin\beta_l \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta_l & 0 & \cos\beta_l \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\upsilon_t & \sin\upsilon_t \\ 0 & -\sin\upsilon_t & \cos\upsilon_t \end{bmatrix}.$$

Az elforgatásokat a (2), (3), (4) és (5) kifejezésekkel definiáljuk. Az egyes vektorok indexe jelzi azt, hogy az adott vektor mely koordináta rendszerben van felírva. Így az egyes elforgatásokat a vektorok indexei alapján rendelhetjük a koordináta rendszerekhez. Az eltolások az 1-es ábráról leolvashatók.



1. ábra
Koordináta rendszerek

Az összetett transzformációkat e rész transzformációk egymás utáni alkalmazásával hajtjuk végre. Példaként határozzuk meg a törzs szögsebességét – amelyet a törzshöz kötött koordináta rendszerben adunk meg – a lapát rendszerben:

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{t}} = \mathbf{M\,G\,H\,D\,\omega}\,; \tag{6}$$

A (6) kifejezésben a bal oldalon a szögsebesség indexe a koordináta rendszer jelzésére szolgál. A szögsebesség ω_x összetevője az orsózó, az ω_y a bólintó és az ω_z összetevője a legyező mozgást jelöli.

A ROTORLAPÁT MOZGÁSEGYENLETE

A rotorlapát mozgása, az adott feltételek esetén, a nem inercia rendszerekre vonatkozó, az általános forgó mozgást leíró vektor differenciál egyenlettel írható le:

$$\frac{\delta\,\boldsymbol{\omega}}{\delta\,t}\,\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{\omega}\times\left(\boldsymbol{\Theta}\,\boldsymbol{\omega}\right)=\mathbf{M}_0-\left(\boldsymbol{\rho}_s\times\mathbf{a}_0\right)m\,; \tag{7}$$

ahol: $\boldsymbol{\omega}$ - a rotorlapát szögsebessége;
$\boldsymbol{\Theta}$ - a rotorlapát tehetetlenségi tenzora;
$\mathbf{M}_0$ - a rotorlapátra ható, a választott koordináta rendszer origójára vonatkozó, eredő nyomaték;
$\boldsymbol{\rho}_s$ - a rotorlapát súlypontjának helyvektora;
$\mathbf{a}_0$ - a választott koordináta rendszer origójának gyorsulása.

A tényleges számításban a (7) vektor differenciálegyenlet minden tagja egy további „ t ” indexet kap, mivel a számolást az (x_t y_t z_t) rendszerben végezzük el. Ez azonban egyúttal azt is jelenti, hogy a választott koordináta rendszerben a csapkodó mozgásból illetve a kormányzásból eredő υ_t szögváltozás miatt megjelenik e szögváltozásból származó szögsebesség és szöggyorsulás összetevő is. A továbbiakban az idő szerinti differenciálást átírjuk az azimút szög szerinti differenciálássá:

$$\dot{\beta}_l=\frac{d\,\beta_l}{d\,\psi_r}\,\frac{d\,\psi_r}{d\,t}=\beta_l^{'}\,\Omega\,; \tag{8}$$

Ez, a fenti példa szerint azt jelenti, hogy – ha a rotortengely szögsebessége (Ω) állandónak tekinthető – akkor az idő szerinti derivált egyenlő az azimút szög szerinti derivált és a szögsebesség szorzatával.

Végeredményben, a rotorlapátra vonatkozó kinematikai kényszer miatt a (7) vektor differenciálegyenlet „ y_t ” összetevő egyenlete szükséges és elégséges a vizsgált mozgás leírására. Az egyenlet részletes felírása túlságosan nagy terjedelmet igényel, a példa kedvéért egy tagot írunk ki részletesen: a (7) bal oldali első tagját, a szögsebesség idő szerinti deriváltját:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\delta\,\boldsymbol{\omega}}{\delta\,t}\right)_y &= \left\{-\upsilon_t^{'}\,\Omega\sin\upsilon_t\,\left[\left(\omega_x\,\sin\psi_r+\omega_y\,\cos\psi_r\right)+\Omega\,\beta_l^{'}\right]\right\}+\\
&\left\{\cos\upsilon_t\,\left[\left(\omega_x\,\Omega\cos\psi_r-\omega_y\,\Omega\sin\psi_r\right)+\Omega^2\beta_l^{''}\right]\right\}+\\
&\left\{\sin\upsilon_t\left[\sin\beta_l\left(\omega_x\,\Omega\sin\psi_r-\omega_y\,\Omega\cos\psi_r\right)\right]\right\}+\\
&\left\{\upsilon_t^{'}\,\Omega\cos\upsilon_t\,\left[\sin\beta_l\left(-\omega_x\,\cos\psi_r+\omega_y\,\sin\psi_r\right)+\cos\beta_l\left(-\omega_z+\Omega\right)\right]\right\}+\\
&\left\{\sin\upsilon_t\left[\beta_l^{'}\,\Omega\cos\beta_l\left(-\omega_x\,\cos\psi_r+\omega_y\,\sin\psi_r\right)-\beta_l^{'}\,\Omega\sin\beta\left(-\omega_z+\Omega\right)\right]\right\}
\end{aligned} \tag{9}$$

A (9) kifejezésben a „vessző” szintén az azimút szög szerinti deriváltat jelenti. A jobb oldal második sorában, az első kapcsos zárójel utolsó tagja a csapkodási szög második deriváltja. A numerikus szimuláció során ezt a deriváltat számítjuk ki, miközben az összes többi tagot ismertnek tekintjük. Ez egyébként nyilván nincs így, de iterációval a megoldást aszimptotikusan megközelíthetjük. Hatnyolc rotor fordulat után a megoldás már gyakorlatilag nem változik, ez már a keresett közelítő megoldásnak tekinthető. A további tagok és a végső, számítási képlet részletes felírásától itt eltekintünk.

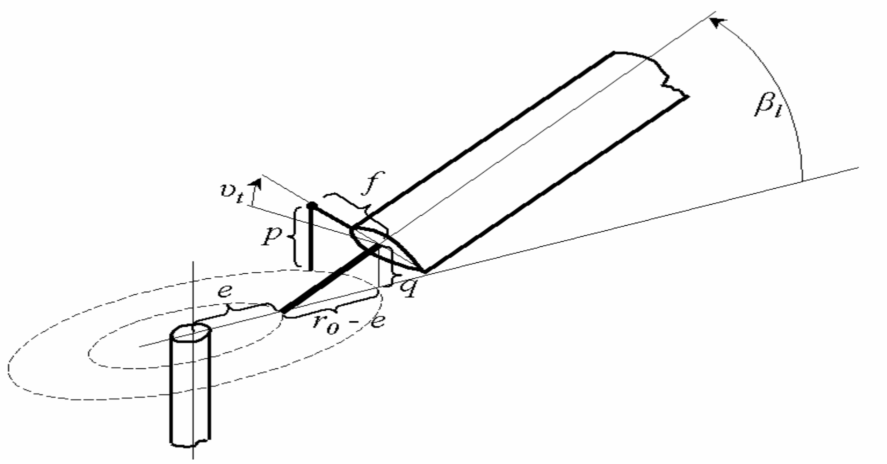
A KORMÁNYZÁS

A helikopterek hagyományos kormányzási rendszerét sok évtizede alakították ki. A legtöbb helikopterben ez a kormányzási rendszer működik napjainkban is. A példaként tekintett MD 500-as helikopter rotorlapátjai is csuklós bekötéssel és hagyományos kormányzási rendszerrel rendelkeznek.

A kormányzás során a helikopter vezetője vagy valamely automatikus rendszer a „ p ” paramétert változtatja, a következő módon:

$$p = p_0 + p_1 \cos\psi_r + p_2 \sin\psi_r ; \qquad (10)$$

A kifejezés jobb oldalán az első együttható a kollektív, a második nagyjából a magassági és végül a harmadik nagyjából a csűrő-kormányzásnak felel meg. Azért csak nagyjából, mert a tényleges kormányrendszerekbe a lapát késése miatt előretartást építenek be.



2. ábra
Hagyományos kormányzási rendszer

A 2. ábra alapján felírható a rotorlapátok vezérlési törvénye:

$$\upsilon_t = Arc\sin\left(\frac{p}{f} + \frac{r_0 - e}{f}\tan\beta_l\right); \tag{11}$$

A kormányzási jellemzők és a csapkodási szög is változik az azimút szög függvényében, ezért megjelenik a rotorlapát hossztengely körüli forgása, annak szögsebessége és szöggyorsulása. Ha ezek kiszámításakor – a hagyományos úttól eltérően – minden tagot pontosan veszünk figyelembe, akkor a szögsebesség:

$$\upsilon_t^{'} = \left(\frac{-p_1\sin\psi_r + p_2\cos\psi_r}{f} + \frac{r_0 - e}{f}\frac{\beta_l^{'}}{\cos^2\beta_l}\right)\frac{1}{\cos\upsilon_t}; \tag{12}$$

és a szöggyorsulás:

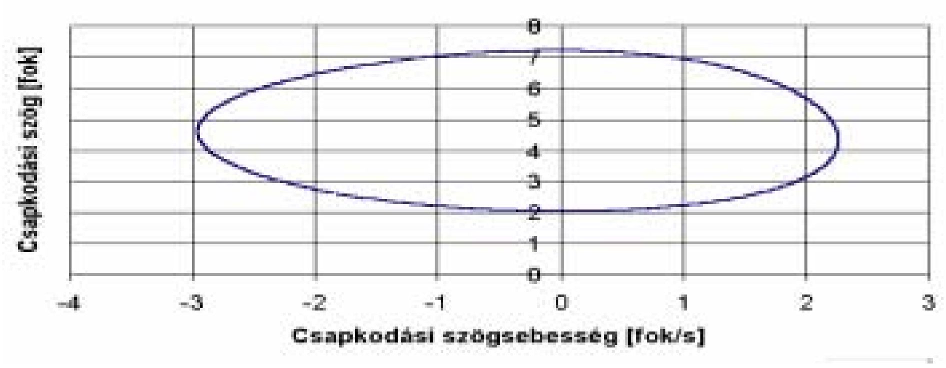
$$\upsilon_t^{''} = \left[\begin{array}{l} \dfrac{-p_1\cos\psi_r - p_2\sin\psi_r}{f} + \\ \dfrac{r_0 - e}{f}\left(\dfrac{\beta_l^{''}}{\cos^2\beta_l} + \dfrac{2\left(\beta_l^{'}\right)^2}{\cos^2\beta_l}\right) + \sin\upsilon_t\left(\upsilon_t^{'}\right)^2 \end{array}\right]\frac{1}{\cos\upsilon_t}; \tag{13}$$

A (11), (12) és (13) összefüggéseket, bevezetve a kis csapkodási szög és elcsavarodási szög feltételezést egyszerűsíthetjük, így a hagyományos kifejezésekhez jutunk. A numerikus vizsgálat azonban megengedi a teljes, egyszerűsítés nélküli alak használatát.

A NUMERIKUS VIZSGÁLAT

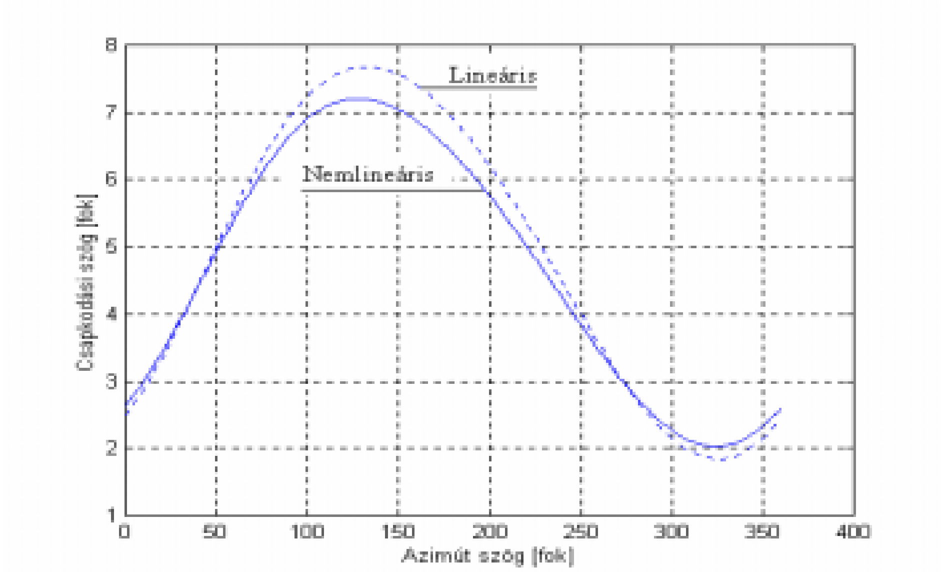
A rotorlapát mozgását – a fent bevezetett aerodinamikai-dinamikai modell segítségével – numerikusan vizsgáljuk. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a számolást homogén kezdeti feltételekkel elindítjuk és a mozgásegyenlet integrálását addig folytatjuk, amíg a megoldás egy Poincare féle határciklust el nem ér. A helikopter rotor mozgásállapotát a $\lambda = 0.049$ -es átáramlási szám és a $\mu = 0.175$ -ös előrehaladási fok jellemzi.

A határciklus elérését Cauchy konvergencia kritérium szerint vizsgáljuk. Megjegyzendő, hogy a valóságban megjelenő határciklus részint hasonló a 3. ábrán feltüntetett határciklushoz, részint azonban a determinisztikus káosz jeleit mutatja, azaz a fázissík pontok egyetlen zárt görbe helyett egy véges szélességű sávban futnak – ezt a véges szélességű, szabálytalan gyűrűhöz hasonló sávot nevezzük a kaotikus megoldás korlátos különös attraktorának.



3. ábra
Fázissík diagramm

Fontos tulajdonsága a numerikus megoldásnak az is, hogy a rotorlapát lefele viszonylag lassan, felfele viszonylag gyorsan mozog. Ez megállapítható a 3. ábrán látható görbe aszimmetriája alapján is, de a konkrét eredmények vizsgálatával is. A számítási példa alapesetében a rotorlapát lefele mozgást 196 foknyi azimút szög tartományban végzett, illetve, ennek megfelelően felfele mozgásra 164 foknyi azimút szög tartományban került sor. Ez a tulajdonság azért fontos, mert megnehezíti a rotorlapát mozgásának harmonikus approximációját.

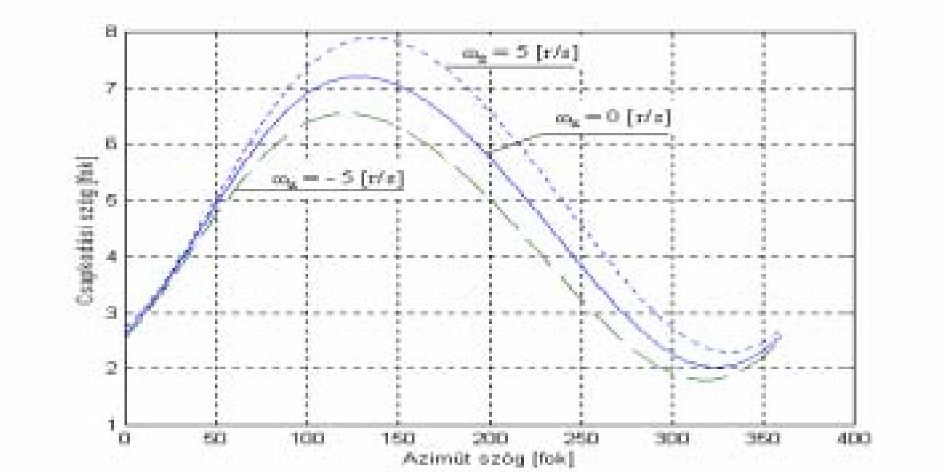


4. ábra
Lineáris és nemlineáris kormányzás

A numerikus vizsgálatban a kormányzást a nemlineáris modellel vettük figyelembe. A linearizált és a valóságos kormányzási modell közötti különbség, a számítási példa alapesetében a 4. ábrán látható. Az eltérés néhol jelentéktelen, azonban a legnagyobb felcsapási szögnél a 10%-ot is eléri – méghozzá a valóságos modell szerint a felcsapási szög kisebb, mint a linearizált modellel számított szög. Általában: az eltérés ott nagy, ahol a csapkodási szög nagy és nagy a csapkodási szög második deriváltja is.

A LEGYEZŐ MOZGÁS VIZSGÁLATA

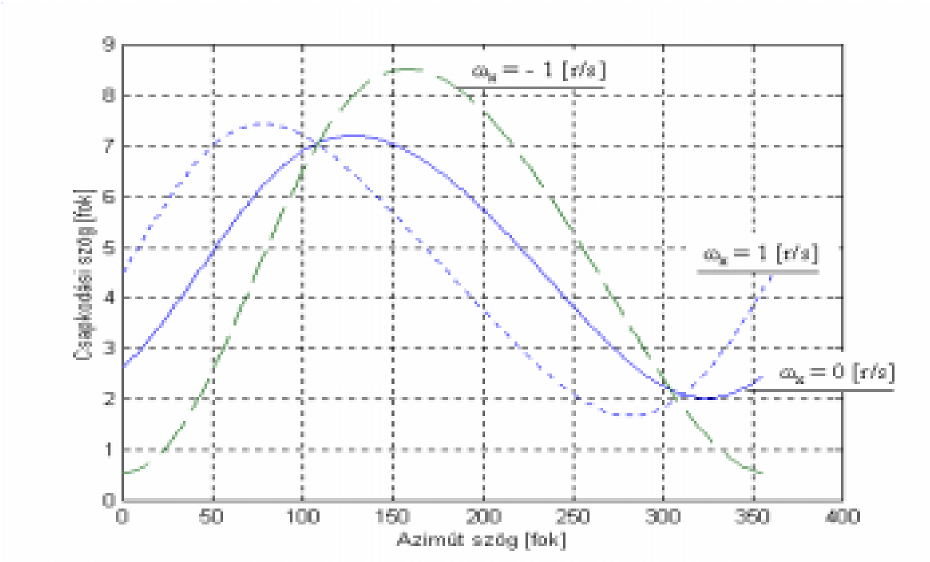
A legyező mozgás olyan, járulékos forgó mozgást jelent, amikor az ω_z szögsebesség összetevő nem nulla. Ez olyan járulékos forgás, ami megnöveli vagy lecsökkenti a rotortengely körüli forgás sebességét. A helikopterhez rögzített rendszerben ennek a szögsebesség összetevőnek az értelme a rotor rendszerrel ellentétes. Ennek megfelelően pozitív ω_z esetén, a kissé lassuló forgás miatt az alapkúpszög kb. 0.45 fokkal csökken és a rotorkúp az alaphelyzethez képest kb. 0.35 fokkal hátra billen. Negatív ω_z esetén az alapkúpszög kb. 0.44 fokkal nő és az alaphelyzethez képest kb. 0.35 fokkal előre billen.



5. ábra
A legyező mozgás vizsgálata

A rotorkúp oldaldőlése alaphelyzetben kb. 1.77 fok, ez az érték csak keveset (~0.06 fok) változik. A legyező mozgásra a rotorlapát mozgása viszonylag kevésbé érzékeny.

AZ ORSÓZÓ MOZGÁS HATÁSA

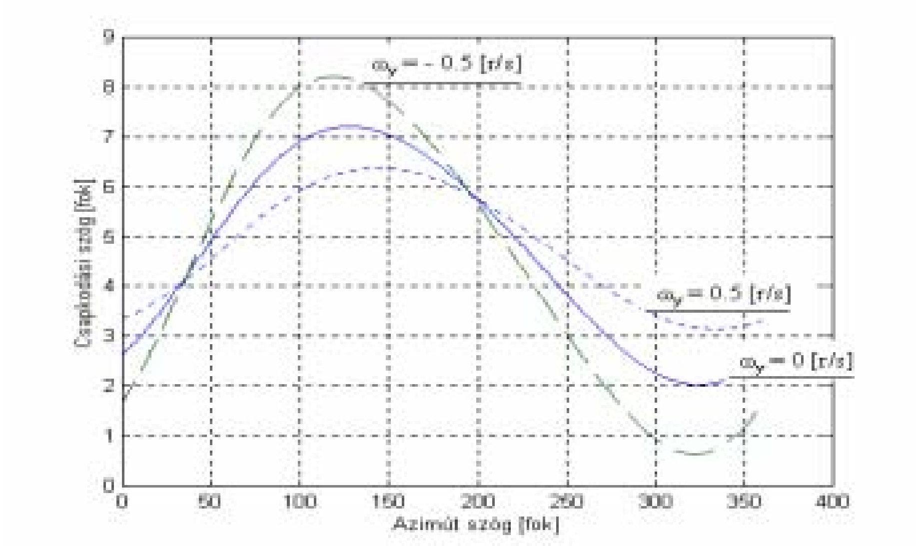


6. ábra
Az orsózó mozgás vizsgálata

Az orsózó mozgásra hatására az alapkúpszög alig változik, jelentősen módosul viszont az előre és oldaldőlés. Pozitív ω_x esetén a rotorkúp az alaphelyzethez képest kb. 1.7 fokot előre és kb. 1 fokot balra billen. Negatív ω_x esetén a rotorkúp az alaphelyzethez képest kb. 2 fokot hátra és kb. 1 fokot jobbra billen. Az oldaldőlés ilyen tendenciája egyébként előre becsülhető. Igen lényeges, hogy negatív ω_x esetén a csapkodó mozgás amplitúdója mintegy 4 fokkal megnövekszik.

A BÓLINTÓ MOGZÁS HATÁSA

A rotorlapátok a legérzékenyebben a bólintó mozgásra reagálnak. Az oldaldőlés változása előrebillenésnél az alaphelyzethez képest balra, hátrabillenésnél az alaphelyzethez képest jobbra kb. 1-1 fok. Az alaphelyzethez képest előrebilleneskor a rotorkúp kb. 0.5 fokot hátra billen; hátrabilleneskor kb. 0.5 fokot előre billen. A csapkodó mozgás amplitúdója orremelő mozgás esetén kb. 1.8 fokkal csökken, orrleadó mozgásnál viszont kb. 3 fokkal növekszik.



7. ábra
A bólintó mozgás vizsgálata

ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

A helikopter törzsének forgó mozgása a rotorlapátok mozgására esetenként jelentős hatást fejt ki. A rotorkúp billenése az erő és nyomatéki viszonyok változását jelzi, amit kormányzással kell követni. A legkisebb hatással a legyező mozgás bír, az orsózás hatása sokkal jelentősebb és még ennél is nagyobb a bólintó mozgás jelentősége. E két utóbbi esetben a csapkodó mozgás amplitúdója akár erősen is megnövekedhet, ami esetleg veszélyes lapát-faroktartó közelítésekhez vezethet.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Bramwell, A.R.S.: Helicopter Aerodynamics, Edward-Arnold Ltd. 1976
[2] Gausz, T.: Helikopterek. BME Mérnöktovábbképző Intézet Budapest, 1982.
[3] Johnson, W.: Helicopter Theory, Princeton University Press, 1980
[4] Szilágyi, D.: Rotorlapátok terheléseinek dinamikai és aerodinamikai vizsgálata, PhD értekezés, Budapest, 2003.
[5] Stepniewsky, W. Z.- Keys, C. N.: Rotary-Wing Aerodynamics. Dover Publications, Inc., New York 1984.