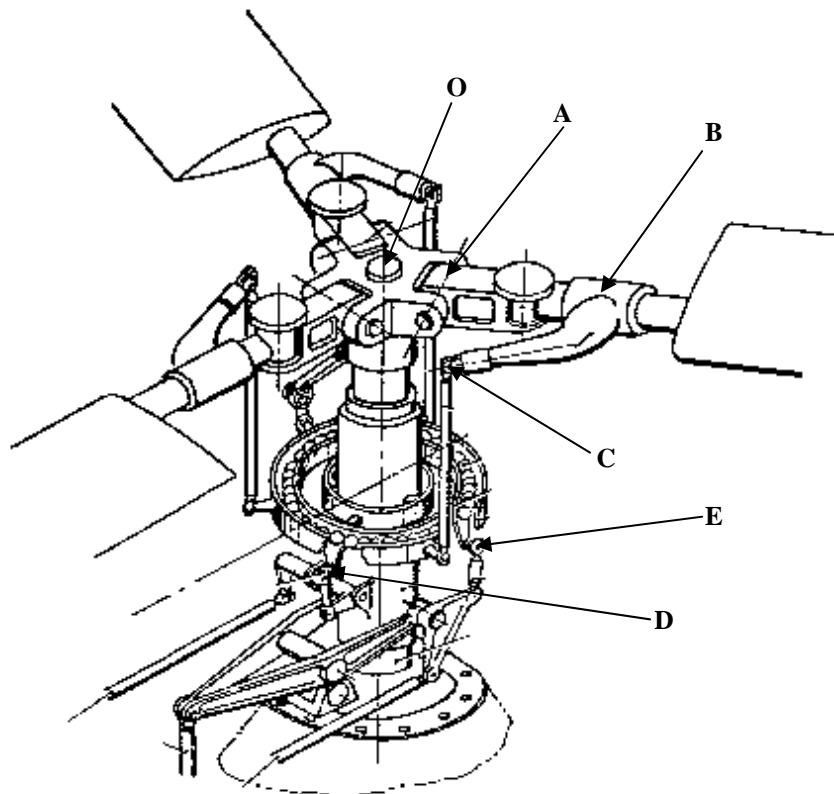


Varga Béla

A GYŰRŰS VEZÉRLŐAUTOMATA KIALAKÍTÁSÁNAK AERODINAMIKAI ÖSSZEFÜGGÉSEI

A helikopterek repülésével foglalkozó szakemberek jól ismerik a gyűrűs vezérlőautomata szerkezeti kialakítását, működését.



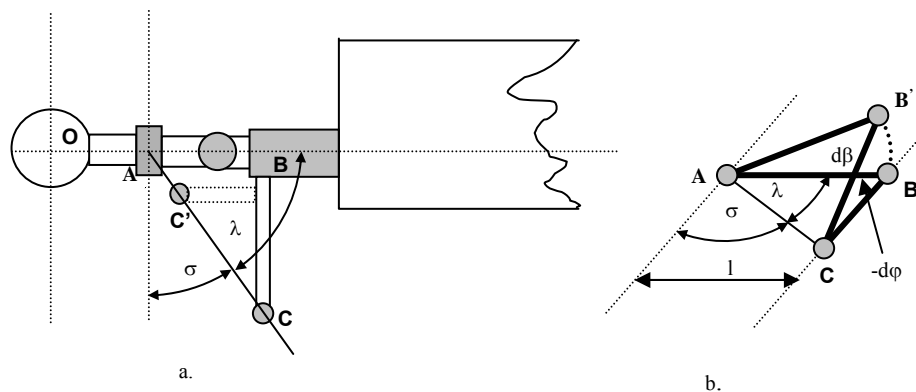
1. ábra. A gyűrűs vezérlőautomata szerkezeti kialakítása

Ezeket a szerkezeteket széleskörűen alkalmazzák a helikopterek hossz és keresztirányú, valamint közös állásszög vezérlésének biztosításához. Ilyet látunk az 1. ábrán is. Viszonylag egyszerű szerkezetük jól bevált és megbízhatóan biz-

tosítja az adott feladat végrehajtását. Talán kevésbé ismert, hogy milyen aerodinamikai törvényszerűségek befolyásolják ezekben a vezérlő-automatáknak a kialakítását. Különösen érdekes ilyen szempontból az 1. ábrán látható **C** csomópont elhelyezése, melynek, mint látni fogjuk döntő hatása van a helikoptereknek mind a kormányozhatósági, mind pedig a stabilitási jellemzőire. Ebben a cikkben ennek a csomópontnak az elhelyezését szeretném megvizsgálni különböző aerodinamikai összefüggések alapján.

A FORGÓSZÁRNY CSAPKODÁS CSILLAPÍTÁSA

Tudjuk, hogy ferde átáramlás (a helikopter haladó repülése) esetében a forgószárnyak megfúvása asszimmetrikussá válik és ennek megfelelően a lapátok csapkodó mozgást végeznek. Az előrehaladó lapátok 180°-on keresztül felcsapnak, a hátrahaladó lapátok pedig lecsapnak.



2. ábra

Ha további hatásokat nem veszünk figyelembe ez a forgáskúp hátra dőléséhez vezet. Ezt a hatást az úgynevezett csapkodás kompenzálással lehet csökkenteni. Erre láthatunk példát az 1. ábrán illetve felülnézetben a 2. ábrán. Szerkezetileg ezt úgy érhetjük el, hogy a lapátállító rudazat csuklós csomópontját (**C**) a vízszintes csukló tengelyvonalán kívülre helyezzük. Ebben az esetben, mivel a **C** pont fixnek tekinthető a lapát csapkodása közben, a lapát felcsapása állásszög csökkenést, 2/b. ábra, lecsapása pedig állásszög növekedést okoz. A csillapítás mértékét a következő összefüggéssel adhatjuk meg a 2/b. ábra alapján:

$$k = -\frac{d\varphi}{d\beta} \quad (1)$$

ahol:

k — csapkodás csillapítási tényező, vagyis egységnyi fel, illetve lecsapáshoz tartozó beállítási szög változás, ahol a negatív előjel azt fejezi ki, hogy adott csapkodási szöghöz ellentétes előjelű beállítási szög változás tartozik (pl. felcsapáshoz a beállítási szög csökkenése).

A csapkodás csillapítási tényezőt a szerkezeti egységek geometriai adatai alapján is kifejezhetjük. A $\mathbf{B-B'}$ távolságot kétféleképpen is megadhatjuk:

$$l \cdot d\beta = -\frac{l}{\operatorname{tg} \sigma} \cdot d\varphi \quad (2)$$

Ahonnán az (1) és a (2) egyenletek alapján:

$$k = -\frac{d\varphi}{d\beta} = \operatorname{tg} \sigma = \operatorname{ctg} \lambda \quad (3)$$

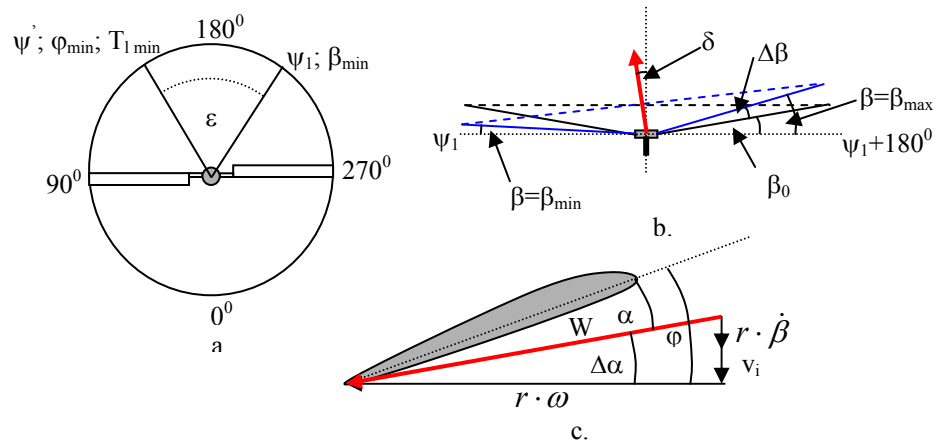
Láthatjuk azonban azt is a 2. ábráról, hogy a függőleges csukló alkalmazása miatt a lapátok forgási síkjában létrejövő lengések jelentősen befolyásolják σ értékét és ezzel csapkodás csillapítás mértékét is, ha a lapátelfordító kar csuklós csomópontja a \mathbf{C} pontban van. Ha ez a csomópont a lapátelfordító kar célszerű kialakításával $\mathbf{C'}$ pontba kerül a csillapítás mértéke nem változik, hiszen az csak σ értékétől függ, ugyanakkor a lapát forgási síkjában bekövetkező lengések is minimális hatással lesznek σ értékére, mivel ebben az esetben $\mathbf{C'}$ pont egy olyan köríven mozdul el amelynek a σ szöghöz tartozó $\mathbf{A-C}$ pontok által meghatározott egyenes az érintője, vagy közelítően az érintője.

A CIKLIKUS VEZÉRLÉS ELŐVEZÉRLÉSI SZÖGÉNEK MEGHATÁROZÁSA (ε)

A csuklós lapátbekötésű forgószárnyak ciklikus beállítási szögének vezérlésekor tudjuk, hogy a körülfordulás során a forgószárny vonóerő a botkormány kitérítésének irányába, vagyis valamely azimut szög (ψ_1) irányába megdől (közben nagysága nem változik), aminek hatására vezérlőnyomaték jön létre a hossz, vagy kereszt tengely, vagy mindkettő körül. Ennél a ψ_1 azimut szögnél lesz a lapátok felcsapási szöge (β) minimális, vagyis a lapátok lefelé történő mozgása megáll és a következő 180° -on keresztül elindul felfelé. Azt gondolhatnánk, hogy amerre megdőlt a forgószárny vonóerő ($\psi_1; \beta_{\min}$), ott kell, hogy legyen a minimális a lapátbeállítási szög (φ_{\min}), illetve ennek megfelelően a minimális lapátvonóerő ($T_{1\min}$).

Ez azonban nem igaz, mivel ha kézzel körbe forgatjuk a forgószárnyat, azt tapasztaljuk, hogy a minimális lapátbeállítási szöghöz, illetve ennek megfelelően a minimális lapátvonóerőhöz tartozó azimut pont (ψ') megelőzi valamilyen szögértéssel azt a ψ_1 -el jelölt azimut pontot, ahol a lapát felcsapási szöge lesz minimális és amerre ezáltal a vonóerő is megdől. Ez azonban teljesen érthető, mivel a lapátok tehetetlenségük és rugalmasságuk folytán bizonyos késéssel rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy a minimális vonóerőhöz tartozó ψ' azimut pont után a lapát még továbbra is lefelé mozog ψ_1 azimut pontig annak ellenére, hogy a lapátvonóerő már növekszik. A két azimut pont közötti szöget úgynevezett *elővezérlési*, vagy *sietési szögnek* nevezzük és jelen esetben ε -al jelöljük. Ezt láthatjuk az 3/a. és 3/b. ábrán.

Azt tapasztaljuk, hogy ez az elővezérlési szög is szoros kapcsolatban lesz az 1. és 2. ábrákon látható C csomópont elhelyezésével. Tehát érdemes lesz ezt is közelebbről megvizsgálni.



3. ábra.

Ehhez segítséget nyújt a 3/c. ábra, amelynek segítségével meghatározhatjuk az eredő megfúváshoz (W) tartozó jellemző szögeket.

A lapátbeállítási szögének meghatározása (φ)

A beállítási szöget a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_{VA} - k \cdot \beta \quad (4)$$

ahol:

- φ_0 — a forgószárny lapátok EVK-val beállított közös beállítási szöge;
- φ_{VA} — a botkormány elmozdítása miatt létrejött ciklikus beállítási szög;
- $k\beta$ — a csapkodás csillapítás miatt létrejött beállítási szög csökkenés.

A csapkodási szög (β) is két részből tevődik össze:

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta = \beta_0 + \delta \cdot \cos \psi = \beta_0 + \delta \cdot \cos \omega \cdot t \quad (5)$$

ahol:

- β_0 — a φ_0 közös beállítási szöghöz tartozó felcsapási szög;
- δ — a forgószárny vonóerő megdőlése ψ_1 azimut szög irányába;
- $\Delta\beta$ — a ciklikus vezérlés miatt bekövetkező csapkodás, amely egy cosinusos összefüggéssel írható le, értéke ψ_1 azimut pontnál $-\delta$, illetve ψ_1+180° -nál δ ;
- ω — a forgószárny szögsebessége.

A lapátelelem $\Delta\alpha$ szögének meghatározása

$\Delta\alpha$ értékét tangens szögfüggvénnyel határozhatjuk meg a 3/c. ábra alapján, mivel azonban $\Delta\alpha$ értéke kicsi, így a következő egyszerűsítést tehetjük:

$$\operatorname{tg} \Delta\alpha \approx \Delta\alpha \approx \frac{v_i + r \cdot \dot{\beta}}{r \cdot \omega} \quad (6)$$

A csapkodási szög (β) idő szerinti első deriváltja adja meg a csapkodó mozgás szögsebességét, amit a (5) egyenlet segítségével határozhatunk meg.

$$\frac{d\beta}{dt} = \dot{\beta} = -\omega \cdot \delta \cdot \sin \omega \cdot t = -\omega \cdot \delta \cdot \sin \psi \quad (7)$$

Vagyis ez alapján a (6) egyenletet a következőképpen írhatjuk fel:

$$\Delta\alpha = \frac{v_i}{r \cdot \omega} - \delta \cdot \sin \psi \quad (8)$$

ahol:

- v_i — a forgószárny síkjára merőleges indukált sebesség;
- r — a vizsgált profil forgásközépponttól vett távolsága.

A lapátelelem állásszögének meghatározása

Felhasználva a (4), (5), (8) összefüggéseket a lapátelelem állásszöge:

$$\alpha = \varphi - \Delta\alpha = \left[\varphi_0 - k \cdot \beta_0 - \frac{v_i}{r \cdot \omega} \right] + \left[\varphi_{VA} - k \cdot \delta \cdot \cos \psi + \delta \cdot \sin \psi \right] \quad (9)$$

A lapelem állásszögének összetevőit két szögletes zárójellel két részre bontottam. A baloldali zárójeles részben azok a tagok vannak, amelyeknek az értéke a körülfordulás során nem változik. A jobboldali zárójelben lévő tagok ciklikusan változnak a körülfordulás során.

Tudjuk, hogy a ciklikus vezérléskor a vonóerő nagysága nem változik, vagyis a jobboldali zárójelben lévő tagok összege zérus a körülfordulás során. Ezt, illetve a (3) egyenletet és néhány trigonometrikus összefüggést felhasználva:

$$\begin{aligned} \varphi_{VA} = \delta(\operatorname{ctg} \lambda \cdot \cos \psi - \sin \psi) &= \frac{\delta}{\sin \lambda} (\cos \lambda \cdot \cos \psi - \sin \lambda \cdot \sin \psi) = \\ &= \frac{\delta}{\sin \lambda} \cos(\psi + \lambda) \end{aligned} \quad (10)$$

A (10) egyenletből látjuk, hogy a ciklikus beállítási szög változásának amplitúdója $\delta/\sin\lambda$ és azt is láthatjuk, hogy a ciklikus beállítási szög (lapátvonóerő) változása és a csapkodás között λ fáziseltérés tapasztalható, ami nem más, mint az elővezérlési szög, vagy más néven sietési szög (ε). Ez azt jelenti, hogy $\varepsilon = \lambda$, tehát a sietési szög közvetlen kapcsolatban van a **C** csomópont elhelyezésével. Ha nem alkalmazunk csapkodás kompenzálást (a **C** csomópont a vízszintes csukló tengelyvonalába kerül), akkor $\lambda = 90^\circ$, vagyis az úgynevezett sietési szög pontosan 90° -al lesz egyenlő.

A VEZÉRLŐAUTOMATA DŐLÉSÉNEK VIZSGÁLATA

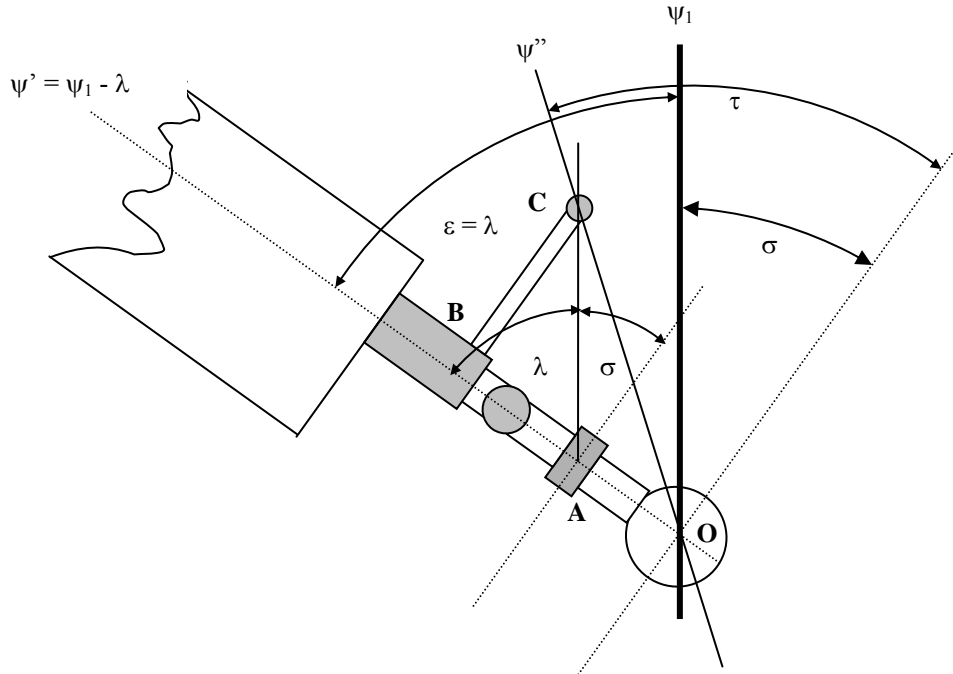
Miután meghatároztuk az elővezérlési szög értékét, vagyis a lapátcsapkodás és a ciklikus lapátbeállítási szög változása közötti fázis eltérést, célszerű lenne meghatározni, hogy mindezt milyen irányú vezérlőautomata dőléssel lehet elérni.

A vezérlőautomata dőlés azimut helyzetének (ψ'') meghatározása

Ehhez a 2/a. ábrán látható forgószárnyat ismét ábrázoltam úgy, hogy felhasználtam a (10) egyenlet eredményét. A (10) egyenlet alapján tudjuk, hogy a forgószárny minimális lapát beállítási szöge $\varepsilon = \lambda$ szöggel lesz a ψ_1 azimut helyzet előtt ($\psi' = \psi_1 - \lambda$), ahol is a forgószárny felcsapási szöge minimális.

A 4. ábra alapján jól követhető, hogy ez akkor jön létre, ha **A-C** pontok által meghatározott egyenes párhuzamos lesz a ψ_1 iránnyal. Az ábrából az is látszik, hogy a vezérlőautomatának ehhez ψ'' irányba kell megdőlnie, ha a vezérlőautomata forgó gyűrűjét és a lapátelfodító karok **C**-vel jelzett csomópontjait összekö-

tő lapátállító rudazat függőleges (mint jelen esetben az 1. ábrán). Ez azt jelenti, hogy a vezérlőautomata dőlése $\tau - \sigma$ szöggel előzi meg a forgószárny forgáskúpjának dőlését.



4. ábra.

A hossz és keresztirányú vezérlés csomópontjainak (D; E) elhelyezése a vezérlőautomata álló gyűrűjén

Ezt a kérdést is megoldhatjuk a 4. ábra alapján. Feltételezzük, hogy a 4. ábrán ψ_1 irány pontosan a $\psi = 180^\circ$ -os azimut helyzetnek felel meg, vagyis a vastag vonal a helikopter hossz tengelyét jelöli ki. Ebben az esetben csak hosszirányú vezérlés jön létre. A vezérlőautomatának az előző fejezetben tárgyaltak szerint $\psi'' = 180^\circ - (\tau - \sigma)$ azimut helyzet felé kell megdőlnie. Kézenfekvő, hogy a hosszvezérlés csomópontját a vezérlőautomata állógyűrűjén is ennél az azimut helyzetnél kell elhelyezni (feltételezve ismét a lapátállító rudazat függőlegességét) a hosszirányú vezérlés függetlenségének biztosítása miatt. Értelemszerűen a keresztvezérlés csomópontját ehhez képest 90° -al el kell tolni.

ÁTTÉTELI VISZONYSZÁM MEGHATÁROZÁSA A VEZÉRLŐAUTOMATA DŐLÉSE (θ) ÉS A FORGÓSZÁRNY FORGÁSKÚP DŐLÉSE (δ) KÖZÖTT

A vezérlőautomata geometriai viszonyait megvizsgálva kapcsolatot találhatunk a vezérlőautomata dőlése (θ) és a forgáskúp dőlése (δ) között. Ennek meghatározásához is érdemes visszatérni a 4. ábrához. Feltételezzük tehát, hogy a vezérlőautomata megdőlt tetszőleges $\psi = \psi'$ pozícióba θ szöggel. Ekkor a forgáskúp $\psi = \psi_1$ irányba dől meg δ szöggel. A lapátbeállítási szög minimuma a $\psi = \psi'$ azimut helyzetnél található és a (10) egyenlet alapján a lapátbeállítási szög csökkenése ennél az azimut helyzetnél $\varphi_{VA} = \delta/\sin\lambda$ lesz. Ismerjük tehát δ és φ_{VA} közötti összefüggést. Már csak az a feladatunk, hogy θ és φ_{VA} között is megtaláljuk az összefüggést.

A vezérlőautomata θ szöggel történő megdőlésekor a **C** pont elmozdulását kétféleképpen is kifejezhetjük.

$$\overline{OC} \cdot \theta = \overline{BC} \cdot \varphi_{VA} = \overline{OC} \cdot \cos \tau \cdot \varphi_{VA} \quad (11)$$

Tehát a (11) egyenlet, illetve a (10) egyenlet alapján:

$$\varphi_{VA} = \frac{\theta}{\cos \tau} = \frac{\delta}{\sin \lambda} = \frac{\delta}{\cos \sigma} \quad (12)$$

Innen:

$$\frac{\delta}{\theta} = i = \frac{\cos \sigma}{\cos \tau} \quad (13)$$

A (13) egyenletben meghatározott $i = \delta/\theta$ hányados az áttételi viszonzszám, amely megadja a vezérlőautomata dőlése és a forgáskúp dőlése közötti viszonzszámot. A (13) összefüggés némileg módosul abban az esetben, ha a vízszintes csukló eltolással van beépítve. Az áttételi viszonzszám értéke kb. 1,5—1,8 között van.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eddigiek alapján belátható, hogy **C** csomópont helyzete egyértelműen meghatározható a τ és a σ szögekkel. Azt is láthatjuk, hogy a fejezetekben tárgyalt összefüggések valamennyi esetben σ , vagy τ és σ függvényei, vagyis értékük **C** csomópont helyzetétől függ. Ennek megfelelően jelentős hatása lesz a vezérlőau-

tomata más egyéb szerkezeti egységeinek kialakítására, illetve a helikopter kormányozhatósági és stabilitási tulajdonságaira. Álljon itt ennek bizonyítására néhány példa:

- és σ értéke meghatározza a hossz és keresztirányú vezérlések bekötési csomópontjainak helyzetét, lásd A vezérlőautomata dőlés azimut helyzetének (ψ'') meghatározása fejezetben;
- a csapkodás csillapítás $k = \tan \sigma$ értéke nem csak a csapkodás csillapításra lesz hatással, hanem a sebesség szerinti statikus stabilitásra is, illetve ezen keresztül a dinamikus instabilitás mértékére is;
- az áttételi viszonyszám $i = \delta/\theta$ hányados meghatározza a $\partial M_{vez}/\partial \theta$ hányadost is, ami egységnyi vezérlőautomata dőléshez tartozó vezérlőnyomatékokat fejezi ki és ezáltal a kormányzás hatásosságára utal.

Mindezzel együtt is a C pont elhelyezésének vannak bizonyos szerkezeti és aerodinamikai korlátai, de láthatjuk, hogy elhelyezése a tervezés során gondos mérlegelést igényel.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A helikopter aerodinamikája és repülési dinamikája, Honvédelmi Minisztérium, Budapest, 1983.
- [2] BÉKÉSI László: Application of the multimedia during teaching of the helicopter flight control, Repüléstudományi Közlemények, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2000. XII. évfolyam, 29. szám, 331 – 339. oldal.
- [3] DR ÓVÁRI Gyula: Helikopter szerkezettan I., Killián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1986.