KOAXIÁLIS ROTOROK AERODINAMIKAI ÉS DINAMIKAI MODELLEZÉSE

Célkitűzésem, hogy létrehozzak egy aerodinamikai-dinamikai-aeroelasztikus viselkedés leírására alkalmas műszaki-matematikai-modellt, mely tetszőleges, egyenes vonalú stacionárius repülési állapotban képes modellezni a koaxiális rotorrendszert különös tekintettel annak alsó rotorjára. Ahhoz, hogy ezt elérjem, együtt kell vizsgálnom a merev és rugalmas lapátmozgásokat, a lapátok fölötti áramlási teret, és a lapátokon ébredő aerodinamikai erőket, figyelembe véve a felső rotor hatását és a profilok körüli áramlás instacionárius voltát egyaránt. A számítás alapja a kombinált impulzus-lapelem elmélet, melyet kiegészítve az ONERA modellel [8] és a felső lapátok lapátvég-örvényeinek hatásvizsgálatával, az indukált sebesség-eloszlás és az instacionárius hatások meghatározhatóak. Amennyiben ez sikeres, az így kapott eredmények felhasználhatóak a helikopter teljesítmény-számításaihoz, egyensúly vizsgálatokhoz, és végül de nem utolsó sorban a lapátterhelések meghatározásával élettartam vizsgálatokhoz is. A kombinált impulzus-lapelem elmélet angol rövidítése a BEMT vagy a CBEMT, elméletileg jól ismert számítási módszer. Az általam alkalmazott, új örvényelméleti kiegészítéssel megvalósítható (az eredeti módszerből hiányzó) a lapátvég örvények nulla eredőjű hatásainak figyelembe vétele is (BEMVT).

A MODELL

Mint azt már a bevezetésben is említettem, a számítási modell négy fő alapra támaszkodik. Ezek rövid áttekintése következik, a korábban e tárgykörben közzétett anyagok figyelembe vételével.

Az impulzus tétel

Az impulzus tétel alkalmazásakor a rotorok külön vizsgálatához az egyes rotorok áramcsövének keresztmetszetét a Galuert-féle összefüggésből kapott felület két azonos területű ellipszisre osztásával helyettesítettem [8]. Az ellipszis egyenletével a keresztmetszeti felületek nagyságát leíró K(yr) függvénnyel a rotorsík egy adott elemében meghatározhatóvá válik az áramlási keresztmetszet.

Lapelem elmélet

A lapelem használatához ismerni kell az egyes keresztmetszetekben, egy adott azimut helyzetnél a sebesség-összetevőket (1. ábra.) egyenes vonalú egyenletes vízszintes repülés esetére. Az alsó rotor esetén ezek az összetevők kiegészülnek a felső rotor által indukált sebességértékekkel valamint a felső rotorok lapátvég-örvényeinek hatásával. Ugyanakkor a számításban a lapátvégeknél egy, a lapátvég veszteségeket figyelembe vevő polinom segítségével a felhajtóerő tényező minden esetben 0 értékűre van csökkentve a véges szárny figyelembe vétele okán.



1. ábra. A lapelem sebességkomponensei

A profilok aerodinamikai tulajdonságainak instacionárius áramlás, okozta megváltozása szintén ezen a helyen vehető figyelembe az ONERA modell összefüggéseivel [2] és [8] alapján. A sebességértékek ismeretében a profiljellemzők és azok időszerinti első deriváltjai meghatározhatóak [3].

A lapát csapkodó és csavaró mozgása

A lapátmozgások vizsgálata a merev lapát koordináta rendszerében a legcélszerűbb. A matató mozgást figyelmen kívül hagyásával, csak a csapkodó és csavaró mozgásokat vettem figyelembe azok szakirodalomból [3] ismert egyszerűsített mozgásegyenleteinek felhasználásával [8]. A számítás során a lapátcsuklókra vonatkozó, eredő aerodinamikai nyomatékot minden esetben zérusnak vettem.

A lapát hajlító deformációja

A számítás során csak a csapkodó értelmű hajlító deformációt vettem figyelembe. Az (1) differenciálegyenlet megoldásához [9] alapján felhasználtam a lapát első 4 sajátlengésképét $\Phi_i(x)$ (i=1,2,3,4). Ez az egyenlet a Lagrange egyenletből vezethető le és segítségével meghatározható a 2. 3. és 4. sajátlengéskép-függvény és a hozzájuk tartozó sajátfrekvencia:

$$q_i'' + \lambda_i^2 q_i = \frac{F_i}{\Omega^2 R^2 m_i}; \quad i=2,3,4$$
(1)

- i-edik általánosított koordináta (q_i) ;
- i-edik sajátfrekvencia ($\lambda_i \Omega$);
- i-edik általánosított tömeg (m_i) .

Koaxiális rotorok aerodinamikai és dinamikai modellezése

A sajátlengésképek, és a hozzájuk tartozó általánosított tömegek valamint sajátfrekvenciák meghatározásakor alapvetően a minden peremfeltételt kielégítő formafüggvényeket alkalmaztam.

A felső rotor hatása

A felső rotor hatását alapvetően két módon vettem figyelembe. Az elsőszámú hatásnak a felső rotor által az impulzus-lapelem elmélet segítségével meghatározott indukált sebességmezőt a második számú hatásként a felső rotor lapátvég-örvényei által az alsó rotorsíkban indukált sebességet tekintettem.

A felső rotor indukált sebességmezőjének hatása

A felső rotor impulzus lapelem-elmélet segítségével meghatározott indukált sebességmezője az üzemállapot függvényében változó mértékben gyakorol hatást az alsó rotorra. Ennek három oka van [5]. Az első és leglényegesebb oka az, hogy a felső rotor áramcsöve a helikopter haladó mozgása következtében a megfúvási sebesség miatt csak részben éri az alsó rotor felületét. A jelentőségében következő hatás a felső rotor áramcsövének szűkülése, mely lapvetően függ a rotor által indukált sebességtől és amely hatása igy függőleges emelkedéskor a legnagyobb. A harmadik hatás a felső rotor áramcsövének áthelyeződése az alsó rotoron, a rotorok oldalra és hátradőlése miatt. Ez a hatás legjobban a nagy sebességű üzemmódokon jelentkezik és tengelyirányú átáramlási üzemmódon nem jelentkezik. Nevezett hatásokat az alábbi módon vettem figyelembe. Az [5] szakirodalom segítségével repülésmechanikai számítás alapján meghatározható volt a rotor állásszöge és a felső rotor áramcsövének hátratolódása (2. ábra) a repülési sebesség függvényében 2800 kg súly esetére a súlyponthelyzettől függetlenül. Ennek segítségével könnyen meghatározható a felső rotor áramcsövének hátracsúszása.



2. ábra. A rotorállásszög és az áramcső eltolódás

Az áramcső szűkülését a felső rotor átlagos indukált sebessége (v_{i0} =1,78 m/s) és a két rotor ismert távolsága (h=1,17 m) alapján 0,95 értékűnek vettem. A rotorok oldalra és hátradőlése a [7] szakirodalom alapján végzett számítások szerint 3,6° és 5,8° egymáshoz viszonyított dőlésszög értékekekre adódik, amelyek által okozott leáramlási zóna vándorlás figyelembe vételétől, csekély mértékük miatt eltekintettem. Ezzel meghatározhatóvá vált az a terület, amelyet nem ér a felső rotor áramcsöve.

A felső rotor lapátvégörvényeinek hatása

A felső rotor hatásai közül a második legjelentősebbnek a lapátvég-örvények fonalai által az alsó rotor síkjában indukált sebességet tekintettem. Ezeknek az örvényeknek a hatását minden repülési üzemmódon külön esetileg kell megvizsgálni. Ez elsősorban a λ átáramlási tényező és a µ előrehaladási fok függvénye. A felső rotor örvényeinek hatását a saját rotoron nem vettem számításba, mivel a felső rotorlapátoktól a leúszó örvények viszonylag távol haladnak, az általános hatásukat pedig az effektív állásszög meghatározásánál figyelembe vett teljes saját indukált sebességmező reprezentálja. Továbbá ugyanezen módon reprezentálja a leúszó örvények általános hatását — mindkét rotorét — az alsó lapát esetében a teljes felső a saját indukált sebességmező figyelembe vételével (2. ábra) a kombinált impulzus-lapelem elmélet. Ugyanakkor a lapátvégörvények lokális, közeli, nulla eredőjű hatását a impulzus-lapelem elmélet nem tudja számításba venni. Ezért szükséges meghatározni azokat a zónákat, amelyekben a felső rotor lapátvégörvény-fonalai hatást gyakorolnak az alsó rotorra. Tengelyirányú átáramlási üzemmódon 6 lapát-örvényfonal találkozási pont van, melyek a λ és μ függvényében vándorolnak — illetve egy részük le is marad — az alsó rotoron. Ezek helyzetét úgy határoztam meg, hogy a felső rotor átlagos merőleges indukált sebesség értékével kiszámítottam egyrészt a függőleges út (h=1,17 m) megtételéhez szükséges időt, másrészt az átlagos kerületi indukált sebesség és a rotor szögsebessége segítségével az átlagos lemaradási azimutszög értéket ($\Delta \Psi$ =214°). Ezzel az értékkel lemaradva az örvényfonalak döféspontjai "folyamatosan követik" az őket létrehozó lapátvéget. Ezután már könnyen meghatározható a 6 találkozási pont azimutja az alábbi:

$$\Delta \Psi_{i} = \frac{214^{\circ} - 120^{\circ}}{2} + i \cdot 60^{\circ} \quad ahol \ i = 0, \dots, 5$$
⁽²⁾

egyenlettel. A pontos azimut pozíció meghatározásán túlmenően meg kellett határozni a radiális elhelyezkedést is. Ezt egyrészt az áramcső-szűkülés mértékével kisebb sugáron, másrészt az üzemállapot (μ) eltolódás mértékével eltolva kapható meg. A találkozási helyek meghatározása utáni következő feladat az örvények intenzitásának meghatározása. Ehhez először a találkozási pontoktól $\Delta\Psi$ =214° értékkel kisebb azimut helyzetben meg kell határozni a lapátokon keletkező felhajtóerő nagyságát. Ez tekintve az impulzus-lapelem alapmodellt nem okozott nehézséget. Ezek segítségével a Zsukovszkíj törvény alapján meghatározható a kezdeti cirkuláció nagysága az Y= $\rho W \Gamma_0$ összefüggéssel. A kezdeti cirkuláció meghatározása után figyelembe vettem az örvény öregedést [4] alapján az alábbi egyenlettel:

$$v(r) = \frac{\Gamma_0}{2\Pi r} \left[1 - e^{\left(\frac{-r^r}{4\omega t}\right)} \right]$$
(3)

A fenti egyenlet segítségével meghatározható a Γ_0 kezdeti cirkulációjú örvény által t idő múlva v viszkozitású közegben az örvénytől r távolságra indukált sebesség nagysága. A következő feladat annak a területnek a meghatározása amelyben az örvényfonal által indukált sebességértékekkel módosítani kellett a felső rotor által indukált sebesség értékeket. Az örvények magjának átmérője is növekszik az idő folyamán, ezért először meg kell határozni mindegyik találkozási ponthoz az örvénymagok átmérőjét a [4]-ben található $rc = \sqrt{4\alpha\delta vt}$ összefüggéssel: ahol α =1,2564312; δ =1+Re_Γ – örvény viszkozitási együttható; Re_Γ=Γ/v – örvény Reynolds szám; a=0,2...0,0002 – empirikus szám, melyet én 0,002 értékűre választottam. A [4] szakiro

Koaxiális rotorok aerodinamikai és dinamikai modellezése

1. táblázat

dalom alapján elegendő az örvényfonal által indukált sebességet az örvényfonal 2,35rc sugarú környezetében vizsgálni. Az így kapott eredményeket μ =015 esetére adódó három döféspontra mutatja az 1. táblázat. A táblázatból látható, hogy a hatáskörzet méretei mindhárom esetben a Descartes koordináta rendszerben a döfés pontokkal szomszédos négy négyzetben érezteti hatását.

Az örvényfonalak adatai u=0.15

	Az örvénymag adatai				Az örvények által indukált sebességek (m/s)				
Ψ	Г	δ	rc (m)	2,35rc (m)	0,525	0,375	0,225	0,075	r (m)
253	40,92	5684,81	0,23	0,54	3,1	4,34	7,23	21,71	М
313	45,81	6363,90	0,24	0,57	3,47	4,86	8,10	24,30	А
13	41,78	5804,02	0,23	0,54	3,16	4,43	7,38	22,16	G

A táblázat a négy négyzet középvonalára számított indukált sebesség értékeket is mutatja, melyek a fonalhoz legközelebb eső négyzetekben eléggé jelentősen módosítják az impulzus-lapelem elmélettel meghatározott indukált sebesség értékeket. Ezután az indukált sebesség értékeket (v_i és $v_{i\Gamma}$) rotor koordináta rendszerben előjelhelyesen összegezni kell, a lapelem elmélet alkalmazásához (1. ábra).

A számítás menete

A számítási eljárás két részből áll: Az első részben meghatározásra kerül az indukált sebesség eloszlás, a vonó, a horizontális, és az oldalerők a felső rotorra. A lépések:

- 1. A kezdeti indukált sebességértékek, és erők számítása a Glauert-féle közelítés alapján;
- A csapkodó és hajlító mozgások differenciál egyenleteinek numerikus integrálása polárkoordináta rendszerben, figyelembe véve az áramlás instacionárius voltát, a csapkodó és a csavaró mozgás közötti kapcsolatot;
- A rotor felülete mentén a légerő eloszlás ismeretében, új indukált sebességeloszlás számítása Descartes koordináta rendszerben. Eredő erők számítása az új helyzetnek megfelelően;
- 4. Az új erőknek megfelelően a csapkodómozgás újraszámítása, majd a 3. lépés, egészen az egyensúlyi helyzet eléréséig, mely gyakorlatilag 10 teljes fordulat után bekövetkezik. Ha nem, akkor a kezdeti kormány-beállítási értékek P_0 ; P_1 ; P_2 nem feleltek meg ennek a repülési helyzetnek, és ezért új értékeket adva előröl kell kezdeni a számítást;
- 5. Az egyensúlyi helyzet sebesség és erőértékeinek tárolása.

A második rész nagyban hasonlít az elsőhöz, csak ott a már figyelembe vesszük a felső rotor előbbiekben kiszámított és megfelelően pozícionált indukált sebességértékeit és kiegé-szítjük a felső sor lapátvég-örvényei által indukált sebesség értékekkel (1. ábra).

A modell hitelesítése

Ahhoz, hogy elfogadhassuk a modellel kapott eredményeket feltétlenül szükség van valamilyen ellenőrzésre. Korábbi munkáimban [9]; [10]; [11] foglalkoztam a [6]-ban publikált mérési eredmények feldolgozásával, mely e módszer hitelesítése szempontjából jó szolgálatot tesz.

A mérés rövid leírása

A mérés lényege, hogy az általam e dolgozatban is vizsgált repülési üzemmódot (IAS: 100 km/h, TOW=2800 kg) is vizsgálták egy telemetriai rendszerrel. A rendszer lehetővé tette, hogy repülés közben szerkezeti reakciókat mérjenek a Ka–26 helikopter alsó rotorlapátján. Az ismert hajlítómerevség- és tömeg-eloszlású mérő-rotorlapátra egységnyi hajlítónyomaték érték-re kalibrált nyúlásmérő-bélyeg párokat ragasztottak [6].

	A mérési ad	atok.	2. táblázat			
No1	No2	No3	No4	No6	No7	No8
-7.02	-11.80	-45.37	.43.99	-46.96	-40.52	33.52
-7.18	-9.779	-44.52	-47.48	-46.47	-39.92	35.35
-8.05	-10.68	-43.37	-28.71	-44.10	-41.18	39.12

Az általuk szolgáltatott jelek (2. táblázat) képezik az előzőekben vázolt számítási modell hitelesítésének alapját. Mivel a mérőrendszer eléggé összetett és ezért sok hibalehetőséget tartalmaz, a jeleket a további felhasználás előtt célszerű megvizsgálni.

A mérési eredmények szűrése

A fentebb említett vizsgálatra feltétlenül szükség van egy nyúlásmérő-bélyegeket, mérőátalakítókat, rádió adókat és vevőket, A/D átalakítókat tartalmazó rendszer esetén [11]. Az elemzések arra engedtek következtetni, hogy a rotorlapátokon repülés közben, a fenti metodika szerint felépített mérőrendszerekkel végrehajtott mérések eredményei, kvantálási hibák kivételével fehérzaj-jellegű hibák, amelyek megfelelő karakterisztikájú szűrőkkel való eltávolítása után azok a további felhasználásra alkalmasak [11]. Ezért én a mérési eredményeket egy 20 dB csillapítású kétpólusú Csebisev-szűrővel megszűrve kaptam egy olyan adathalmazt, melyet hiteles alapnak tekintettem a modellem ellenőrzéséhez [11].

A hitelesítéshez szükséges adatok előállítása a modell segítségével

A hitelesítéshez szükséges adatok előállításához alapvetően a lapát hajlító deformációit leíró adatokat kellett előállítanom a modell segítségével, mivel a viszonyítási alapul szolgáló adathalmaz hajlítónyomaték metszékeket tartalmaz. Erre a legkézenfekvőbb a modell leírását tartalmazó "A lapát hajlító deformációja" fejezetben leírt sajátlengésképek időfüggvény-értékeinek meghatározása kínálkozott. Ez természetesen az iteráció végén, a lapát egyensúlyi helyzetében meghatározott légerő-terhelésre adott szerkezeti válaszreakcióból számítható ki. Itt nem kell mást csinálni, mint a hajlító deformációt reprezentáló 2.; 3.; és 4. sajátlengéskép-függvény lefutását biztosító időértékeket kell meghatározni. Ezek meghatározása viszont az egész modell működése szempontjából amúgy is szükséges, tehát semmiféle külön erőfeszítést nem igényel. Miután ezek az együtthatók rendelkezésre álltak a három sajátlengéskép-függvény együtthatóival vett lineáris kombinációjának lapáthossz szerinti második parciális deriváltját, és az adott mérőhelyeken ismert hajlítómerevség értékeket behelyettesítettem a rugalmas szál differenciál egyenletébe, melyet a nyomatékra rendezve megkaptam az alábbi egyenletet.

$$M_{j} = IE_{j} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} \sum_{i=2}^{4} \Phi_{i}(x)T_{i}(\Psi) \text{ abol } j=1,...,$$
(6)

Koaxiális rotorok aerodinamikai és dinamikai modellezése

Az egyenletet $\Delta \Psi = 5^{\circ}$ azimut lépésenként megoldottam minden mérőhelyen, és így megkaptam azt az adatbázist, melyet a szűrt mérési eredményekkel kell összehasonlítani ahhoz, hogy a modell hitelességéről képet kapjak.



Az adatok összehasonlítása





Miután a szükséges adatok rendelkezésre álltak, azok mérőhelyenkénti grafikus összehasonlítását határoztam el. A mért és 20 dB csillapítású Csebisev szűrővel szűrt, illetve a modell segítségével visszaszámított nyomaték metszékeket az egyes mérőhelyeken a 9.a-f. ábrák mutatják. A No 5 mérőhelyen történő összehasonlítás azért hiányzik, mert ez a csatorna nem működött a mérés folyamán. Az eredmények grafikus összehasonlításán túl szükség van az eltérések számszerűsítésére is. Ehhez a négyzetesen integrálható függvények terén értelmezett, a függvényekre vonatkozó skalár szorzat felhasználásával számított hibát (7) használtam fel, mely alkalmas az egyenletesen jó közelítések megítélésére [1].

Koaxiális rotorok aerodinamikai és dinamikai modellezése

6,25

5,15

$$hiba = \frac{\int_{0}^{360} \sqrt{\left[E20(\psi) - AERO(\psi)\right]^{2}} d\psi}{\int_{0}^{360} \sqrt{\left[AERO(\psi)\right]^{2}} d\psi} 100 \%$$
(7)

A fenti összefüggés segítségével az egyes mérőhelyeken meghatározott relatív hiba értékeket mutatja a 3. táblázat.

Eltérés a mért és visszaszámított értékek között							3. táblázat		
Mérőhelvek	No1	No2	No3	No4	No6	No7	No8		

8,98

3,03

A fent leírt műszaki matematikai modell ezáltal hitelesnek tekinthető és a továbbiakban különböző — aerodinamikai; dinamikai; aeroelasztikus; rotorlapát-terhelés; kormányrendszer terhelés; kormánykitérítés hatására a rotoron bekövetkező erő- és nyomaték változás — vizsgálatokra használható fel.

FELHASZNÁLT IRODALOM

hiba [%]

4,83

[1] Bornstein, I. N., Szemengyajev, K. A.: Matematikai Zsebkönyv Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.

5,83

- [2] Gausz, T.: Helicopter Rotors Aerodynamics and Dynamics. 5th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, 1996.
- [3] Gausz, T.: Helikopterek. BME Mérnöktovábbképző Intézet Budapest, 1982.

5,55

- [4] Gausz, T.: Vortex-wake Model for Helicopter Rotors 8th Mini Conference on System Dynamics Identification and Anomalies Budapest, 2002.
- [5] К. Н. Лалетьин: A Ka-26 Helikopter Gyakorlati Aerodinamikája. Repülőgépes Szolgálat, Budapest, 1978.
- [6] H.W. Lindert: Flugmessungen mit dem Hubschrauber Ka-26 im Oktober 1990. Institut für Lichtbau RWTH-Aachen 1992.
- [7] М. Л. Миль: Вертолеты расчет и проектирование 1 Аеродинамика Машиностроение Москва 1966.
- [8] Szilágyi Dénes Koaxiális rotorok aerodinamikai vizsgálata. Repüléstudományi konferencia Szolnok 2001.04.21.
- [9] Szilágyi D.: Rotor Blade Air Load Determination on the Base of Structural Deformation. 2nd Avionics Conference, Bieszczady 98' Jawor, Poland 1998.
- [10] Szilágyi, D.: Rotorlapátok Légerőterheléseinek Dinamikai Vizsgálata poszter MTA AMB 1999. évi Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Gödöllő GATE 1999. 01. 25.
- [11] Szilágyi, D.: Rotorlapátok légerőterhelésének meghatározásához szükséges adatok méréssel történő meghatározása. XVII. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, 2000.