



*A Budapesti Műszaki Egyetem Doktori Tézisbizottsága
Közlekedésmérnöki Kar Doktori Tanácsa*

*Írta
Szilágyi Dénes*

***Rotorlapátok terheléseinek
dinamikai és aerodinamikai
vizsgálata***

*című témakörből,
amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik*

*Témavezető: Dr. Gausz Tamás
BME Repülőgépek és Hajók Tanszék*

**BUDAPEST
2003**

Bevezető

Eddigi tevékenységem szorosan kapcsolódik a helikopterek rotorjához. Ennek az volt az oka, hogy első repülésem egy Ka-26 típusú helikopterrel történt. Majd az idők folyamán jobban megismertem ezt a típust, de a megismerési folyamatban az üzembentartó személyzeteknél és a náluk fellelhető szakirodalomban a rotorlapáttal kapcsolatos ismeretek területén kevés információra tudtam szert tenni. Elhatároztam, hogy valamilyen módon hozzá kell jutnom a hiányzó ismeretanyaghoz. Erre az első komoly lépés a diplomamunkám megírása volt, melyet több, a témával kapcsolatos publikáció és végül ez a dolgozat követett. E dolgozatban a Ka-26 típusú helikopter egyenes vonalú egyenletes repülését vizsgáltam. A típus kiválasztásában döntő szerepet játszott, hogy ezzel a hajtottak végre Magyarországon először - rotorlapát légerő-terhelését meghatározandó – méréseket [1] és korábbi munkáimban e mérések eredményeit néhány vonatkozásban már feldolgoztam.

I. A kutatás célja

Célkitűzésem, hogy létrehozok egy aerodinamikai-dinamikai-aeroelsztikus 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 [2] 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 utolsósorban 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 bevezetett új örvényelméleti kiegészítés alkalmazásával megvalósítható a lapátvég örvények nulla eredőji hatásainak figyelembe vétele, ami az eredeti számítási módszerből hiányzik.

II. Szakirodalmi áttekintés

A rotorlapáton keletkező légerők meghatározásánál az abszolút nagyságon kívül annak térbeli (itt hosszmenti) és időbeli lefutását is ismernünk kell. A feladatra alkalmazható gyakorlati módszerek a különböző szerkezeti vizsgálatok,

melyek valós [1] [3] és modellkísérletek [4][5] egyaránt lehetnek és a szerkezeti reakciók segítségével igyekeznek meghatározni a terheléseket. A következő gyakorlati csoportba tartoznak az aerodinamikai mérések melyek lapát mentén keletkező légerőket a statikus nyomások mérésével és a mért értékek folyamatos rögzítésével határozzák meg. Ez a gyakorlatban meglehetősen komoly nehézségekkel jár és a mérőeszközök vagy a lapát szerkezeti, vagy a lapát aerodinamikai tulajdonságait meg is változtatják. Ennek ellenére nagy kutatóintézetek a számítógépes szimulációk elterjedése előtti időkben sikerrel alkalmazták [6]. Újabban a rotorok körüli áramlási teret jóval érzékenyebb műszerekkel (fűtött szálas anemométer, lézersugár és az u. n. Planar Doppler Velocimetry (PDV) módszer, mely a sebességmező háromdimenziós mérésére alkalmas optikai módszer) végrehajtott mérésekkel igyekeznek meghatározni, akár 1:1 méretarányos szélcsatornában is [5] mivel a hasonlósági követelmények teljes körű kielégítése szinte lehetetlen. A légerők meghatározásánál használt elméleti módszerek egyik legrégebbi képviselője az impulzus elmélet melyet merevszárnyú repülőgépekre sikerrel alkalmaztak, azonban helikopterek esetén a módszer alkalmazása további finomításokat igényel. Ezek elsősorban olyan segéd-függvények alkalmazását jelentik melyek segítségével az ideális rotor által indukált sebességértékeket a hely és az üzemmód függvényében, a valóságoshoz közelítik. Ilyen a Glauert [7] által kifejlesztett háromszög indukált sebesség-eloszlás, mely elég jó közelítést ad. Ugyanakkor ez a módszer nem hozza kapcsolatba a végeredménnyel a lefedési tényezőt, a lapátgeometriát, a lapátszelvények aerodinamikai jellemzőit és azok változását, valamint a lapátvég-veszteségek okait (indukált örvények, összennyomhatóság), a helikopter egyensúlyi és üzemmódot [8]. Manapság a szimulátorok elterjedésével és realizitáskussági követelményeik növekedésével ismét előtérbe került az impulzus tétel a gyors számíthatóság miatt [9].

Következő pontosabb módszer Mangler és Squire módszere (nyomás-potenciál elmélet) mely a sebesség- és a gyorsuláspotenciál-elmélet gyakorlati alkalmazása, mely az Euler egyenletet veszi kiindulásnak. A módszer alaptézise szerint a nyomáseloszlás egy Ψ potenciál-függvény, mely eleget tesz a Laplace egyenletnek. A $\Psi(x,y,z,t)$ megegyezik a $-(p-p_0)/\rho$ mennyiséggel, mely az összennyomhatóság figyelembe vétele esetén válik különösen fontossá és ezt a mennyiséget nevezik gyorsulás potenciálnak – mivel nemcsak a térbeli koordinátáknak, hanem az időnek is a függvénye – és e koncepció alapján készített fizikai-matematikai modellt a nyomás-dipólusok alkalmazásával állítják elő, melyek időbeli változását egy $q(t)$ időfüggvény biztosítja. Kis sebességek esetén eléggé pontos, azonban nagyobb sebesség esetén a távozó sugárban meglehetősen pontatlanná válik és ezért a helikopter törzs, faroktartó, vezérsíkok, farokrotor vizsgálatánál már nem alkalmazható, továbbá nem ad kapcsolatot a rotor-geometria, a szerkezeti tulajdonságok, a vezérlés és az aerodinamikai működés között [10] [11].

A Pitt-Peters eljárás az előző módszer továbbfejlesztésének tekinthető és nagyon népszerű a haladó repülés tárgyalására, mivel már nem valamely uniformizált indukált sebességeloszlást feltételez és figyelembe veszi az áramcső elferdülését is a

haladó mozgás következtében [12]. A modell jelentős fejlődést hozott a leáramlás hosszirányú változásának tárgyalásában haladó repülés esetén, mindazonáltal ez a módszer sem veszi figyelembe a rotor konkrét geometriáját, nem teremt kapcsolatot az aerodinamikai, szerkezeti, vezérlési jellemzők és rotoron kialakuló tényleges áramlási viszonyok között (összenyomhatóság, lapát-kölcsönhatások), ennél fogva a pontossága behatárolt [13].

A lapelem és az impulzus elmélet kombinációja már lehetővé teszi a kétdimenziós profilkarakterisztikák használatát és figyelembe veszi a geometriai kialakítás (húrhossz-eloszlás, geometriai és aerodinamikai lapátelcsavarás) mellett az üzemi paraméterek hatását is, hiszen alapfilozófiája az aerodinamikai jelenségek vizsgálata a lapát keskeny szeleteiben. Ugyanakkor a kiinduláskor itt is alkalmazni kell egy uniformizált indukált sebességeloszlást a rotorsík mentén, mely következtében a meghatározott indukált sebesség, vonóerő, nyomaték értékek nem felelnek meg a valóságos egyensúlyi helyzetnek. Abban az esetben sikeresebbek lehetünk, ha meg tudjuk valósítani a rotorlapátok egyensúlyi helyzetének vizsgálatát és ezzel együtt az egész helikopter egyensúlyi helyzetének a vizsgálatát, figyelembe vesszük a rotorlapátok mozgásformáit is a profiljellemzők meghatározásakor. Így az egyensúlyi helyzetet elérhetjük – egy kezdeti indukált sebesség érték felvétele után – például körülfordulásonként végrehajtott approximációval. Az így kapott áramlási kép sokkal realiztikusabb mint a tisztán impulzus elmélet segítségével számított, meglehetősen idealizált kép. A módszer fontos a tervező számára az általános tervezési irányelvek előzetes meghatározására és végre kapcsolatot ad az áramlás és a lapát geometriai-aerodinamikai jellemzői között [6].

Az örvényelmélet az örvényrendszerek fizikai-matematikai modellezésének alkalmazásával úgy emelő mint mozgó légcsavaroknál elméletben a legsokoldalúbb eszköz jelenleg, a forgószárnyak időátlagos és pillanatnyi sebességmezéjének meghatározására a végtelen térben. Ez az elmélet jobban használható az előzőeknél az időfüggő áramlások vizsgálatára, részletesebben leírja a lapátok interferenciáját és vezérfonalat ad a lapátvég tartományban létrejövő terhelések vizsgálatához is. A legegyszerűbb modellek a rotorlapátot tengelyirányú megfűvésben állandó cirkulációjú, örvényfonallal helyettesítették [14]. A következő lépésben már igyekeztek figyelembe venni lapátvégi felhajtóerőt csökkentő, a nyomáskiegyenlítődésből származó örvény hatását is, lapát hossza mentén nem állandó cirkulációjú hordozóörvénnyel [15]. Ebből fejlődött ki az ekvivalens egyenes örvényrendszer elmélete [16], melynek hatása gyakorlatilag megegyezik a hordozó, a lapátvégi (töben is), a leúszó örvények és az áramcső forgásának együttes hatásával. A fejlesztés során a minőségi ugrást, a véges lapátszám figyelembe vétele jelentette [17] [18] [19] [20] [21]. A konstruktőröknek szüksége volt a terheléseknek a lapát húrmenti megoszlásának ismeretére is. Ennek megoldására fejlesztették ki a „felhajtóerőt termelő felületközelítése” (lifting surface-approach) elnevezésű módszert [16]. A fejlesztés következő fázisa a rotor áramcső szűkülésének számításba vétele volt [21] [22]. A haladó repülés részletes vizsgálatára a legelterjedtebbek a 3 dimenziós modellek

[16] [22] [23]. Az aerodinamikai jelenségekkel kapcsolatos térbeli és időbeli szabadság miatt az örvényelmélet nagymértékben leköti a teoretikusok, az aerodinamikával, aeroelasztikus és a zajjelenségekkel foglalkozók figyelmét és ez a témával kapcsolatos szakirodalom folyamatos bővülését eredményezi [24] [25] [26]. Ezzel párhuzamosan folyamatosan fejlesztik az örvényelméleten alapuló számítógépes programokat, melyek célja a rotorlapátok légerő terheléseinek meghatározása, az aeroelasztikus jelenségek, a rotor sárkány kölcsönhatás vizsgálata [27], a szabad leáramlás alakváltozásának hatása [28] [29] véges lapátszámú modellek esetén, teljesítményszámítások és olyan speciális feladatok, mint a zajvizsgálat. A módszer teljesítményének respektálása mellett az azért megfigyelhető, hogy az eredmények gyakran félrevezetőek és ezért amikor örvényelméleten alapuló számítógépes programokat fejlesztenek, nagyon fontos különböző védelmeket beépíteni, a fizikai alapot nélkülöző, matematikai szingularitásokhoz vezető lehetőségekkel szemben [8].

A lokális momentum elméletet két japán tudós Azuma és Kawachi [30] fejlesztette ki. Célkitűzésük az időátlagos és a pillanatnyi indukált sebességmező meghatározása volt, elfogadható pontossággal és lényegesen egyszerűbb számítási metodikával, mint amit a fentebb felsorolt örvényelméleten alapuló módszerek tesznek lehetővé. Az elmélet az impulzus, a lapelem és az örvényelmélet sajátos keveréke és lényege, hogy egy meglévő szárnyat, a szárny által indukált sebességmezőt, elemi, a feszítáv mentén elliptikus cirkuláció-eloszlással rendelkező, egymás fölé helyezett, csökkenő méretű szárnyakkal helyettesítik. A kísérleti és a számított eredmények jól egyeznek és ez alapján megállapítható, hogy ez egy használható és egyszerű módszer, mely a számítási időt lényegesen lerövidíti.

III. A kutatás eszközei és az alkalmazott eljárások

Célkitűzésem, hogy létrehozak 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. Tekintettel a rendelkezésemre álló számítástechnikai kapacitás és mérési lehetőségek korlátozottságára, valamint a viszonylag „egyszerű” programozhatóságra és kielégítő pontosságra, a modell alapjául a leúszó örvények hatásával kiegészített, kombinált impulzus-lapelem elméletet választottam. A modell pontosságának növelése érdekében figyelembe vettem a lapátmozgásokat, a lapátok fölötti áramlási teret és a lapátokon ébredő aerodinamikai erőket, a felső rotor hatását és a profilok körüli áramlás instacionárius voltát, a rotorlapátok rugalmas deformációját és a lapátvég-örvények hatását is. A feladat megoldásához alapvetően a Power-Basic programnyelv 3.5 verziójában [31] a Dr. Gausz Tamás által egyrotoros

rendszerre kifejlesztett impulzus-lapelem elmélet alapú programot fejlesztettem tovább. Felhasználtam még a MATLAB programcsomagot a mérési eredmények szűrésére valamint a Microsoft Excel programot a nem programozandó számítások elvégzésére és a számítási eredmények ábrázolására. Az impulzus-tétel alkalmazásához meg kellett határozni a koaxiális rotor-rendszer alsó és felső rotorjának ekvivalens áramcső keresztmetszetét, melyet a rotortárcsa mentén a hely függvényében leíró függvénnyel fejeztem ki. Így egy adott koordinátájú helyen a nyomás, a repülési sebesség és a sűrűség ismeretében az indukált sebesség meghatározható. A lapelem elmélet használata során az alsó rotor esetén a klasszikus sebesség-összetevőkön túl figyelembe vettem a felső rotor normális és kerületi indukált sebességeit, a felső rotor lapátvég-örvényei által indukált sebességeket, a lapátvégi feláramlás felhajtóerő csökkentő hatását (egy polinom segítségével a lapátvégen 0 értékre csökkentettem a felhajtóerőt), és az instacionárius megfűvás hatását a profilkarakteristikára az ONERA modell segítségével. A felső rotor hatásának figyelembe vételéhez meg kellett határozni az üzemmódot függvényében azt a zónát, melyen érezeti hatását a felső rotor az alsó rotoron. Itt alapvetően az áramcső hátratólódását és szűkülését vettem figyelembe. A számítás során figyelembe vettem a lapát csapkodó mozgását annak egyszerűsített differenciálegyenletével és csavaró mozgását mely segítségével a vezérlési törvény és a csapkodás kompenzálás hatását vettem figyelembe. A számítás során a lapát csapkodó értelmű hajlító deformációját az első négy sajátlengéskép azimutális együtthatókkal vett lineáris kombinációjával közelítettem, mely azimutális együtthatók a modell hitelesítéséhez és a rotor szilárdsági vizsgálatához nélkülözhetetlenek.

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 helikopter tömegének, a λ , μ tényezők, az α_R meghatározása;
2. A kezdeti indukált sebességértékek és erők számítása a Glauert-féle közelítés alapján;
3. A csapkodó és hajlító mozgások differenciál egyenleteinek numerikus integrálása polár-koordináta rendszerben, figyelembe véve az áramlás instacionárius voltát, a csapkodó és a csavaró mozgás közötti kapcsolatot;
4. A rotor felülete mentén a légerő eloszlás ismeretében, új indukált sebességeloszlás számítása Descartes koordináta rendszerben. Eredő erők számítása az új helyzetnek megfelelően;
5. 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 előlről kell kezdeni a számítást;
6. Az egyensúlyi helyzet sebesség és erőértékeinek tárolása.

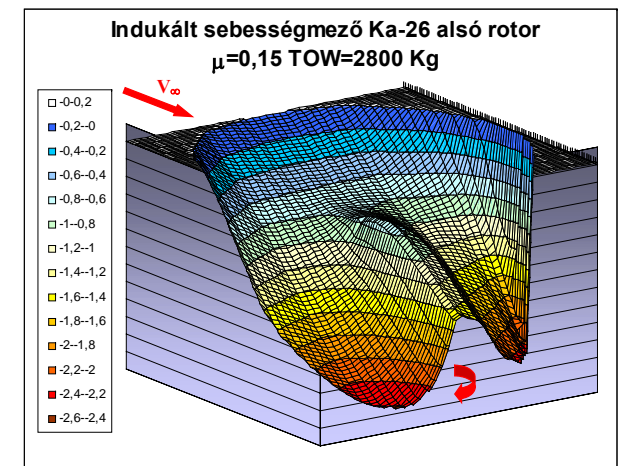
A második rész nagyban hasonlít az elsőhöz, csak ott a számításnál már figyelembe vesszük a felső rotor előbbieken kiszámított és megfelelően pozícionált indukált sebességértékeit és kiegészítjük a felső sor lapátvég-örvényei által indukált sebesség értékekkel.

A modell hitelesítésére [1]-ben publikált és korábbi munkáimban [3]; [32]; [33] már feldolgozott mérés eredményei szolgáltak. A mérés lényege az volt, hogy repülés közben egy Ka-26 típusú helikopter alsó rotorlapátján elhelyezett egységnyi hajlítónyomaték értékre kalibrált nyúlásmérő bélyegek, csapkodási szög adó és fordulatszám-láló jeleit telemetrikus rendszerrel a földre továbbítva rögzítették. A modell segítségével meghatározott, az előzőekben említett azimutális együtthatóknak a lapát sajátlengés függvényeivel vett lineáris kombinációjával a rugalmas szál differenciál egyenlete numerikusan egyszerűen megoldható. Így gyakorlatilag a mérési üzemmódotnak megfelelő paramétereket beállítva, elvileg ugyanazon nyomatékmetszések a lapát hossza mentén egy adott azimutnál meghatározhatóak. A kétpólusú Csebisev-szűrővel szűrt és a modell segítségével visszszámított jelek eltéréseinek számszerűsítésére a négyzetesen integrálható függvények terén értelmezett, a függvényekre vonatkozó skalár szorzat felhasználásával számított hibát használtam fel, mely alkalmas az egyenletesen jó közelítések megítélésére [34]. Az egyes mérőhelyeken az eltéréseket az 1. táblázat

Mérőhelyek	No1	No2	No3	No4	No6	No7	No8
hiba [%]	14,4	15,01	24,38	22,04	18,59	21,77	23,22

1. táblázat. A két eredmény relatív hibája a mérőhelyeken

mutatja $\mu=0,15$ üzemmód esetére. A fenti eredmények alapján hitelesnek tekintettem a modellt. A modell aerodinamikai alkalmazásaként meghatároztam különböző repülési üzemmódokra a rotorok normális irányú és kerületi indukált sebesség eloszlását. Az alsó rotor normális irányú indukált sebességmező-jét mutatja az



1. ábra.

1. ábra. Az alsó rotor normál irányú indukált sebességmező [m/s]

A modell segítségével meghatározott mozgásjellemzők felhasználásával lehetővé válik a rotorlapát terheléseinek teljes körű meghatározása és ezáltal lehetővé válik a statikus szemlélet alapján a külső hatások szuperpozíciójából meghatározott és a velük egyensúlyt tartó belső erők összehasonlítása.

A statikai hajlító terhelés meghatározásánál, az alábbiakat vettem figyelembe: a felhajtó, a centrifugális és a tehetetlenségi erők nyomatakait.

A dinamikai hajlító terhelés alapjának a szerkezet csapkodó irányú deformációjából keletkező belső feszültségeket tekintettem. Ezek meghatározásához az alábbi összefüggéseket használtam a rugalmas szál differenciál egyenlete alapján, a megoszló terhelés számításához:

$$M_{DIN}(x_1, \psi) = IE(x_1) Y''(x_1, \psi) \quad (1)$$

és ebből a szélső szálban ébredő húzófeszültség:

$$\sigma_{DEF} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sum_{i=2}^4 \Phi_i(x_1) H_i(\psi) Ee(x_1) \quad (2)$$

Meghatároztam a redukált feszültségek értékét mind statikus, mind dinamikus esetben [35] az alábbi összefüggéssel:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_r^2 + 4\tau_y^2} \quad (3)$$

Statikus esetben az eredő húzófeszültség a felhajtóerő, a centrifugális erő, a tehetetlenségi erő hajlítónyomatékából és a centrifugális erő húzásából számított feszültségek összege. A nyíróerők esetében csak a felhajtóerő okozta

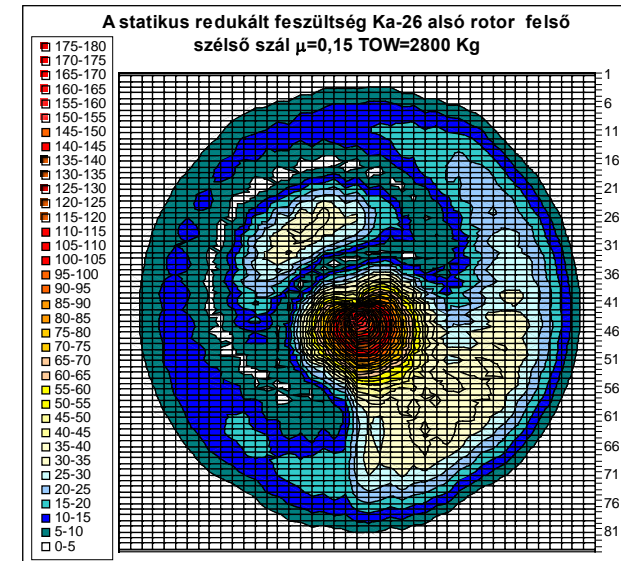
Üzem mód	$\sigma_{din}/\sigma_{stat}$	$\sigma_{redStat}/\sigma_B$	σ_{redDin}/σ_B	ϵ_{Stat} (m/m)	ϵ_{Din} (m/m)	τ_y/τ_B
$\mu=0,025$	12/85 (14,1%)	135/420 (32,14%)	56/420 (13,33%)	0,0045	0,0019	2,8/40 (7%)
$\mu=0,15$	15/180 (8,3%)	180/420 (42,85%)	60/420 (14,28%)	0,006	0,002	2,6/40 (6,5%)
$\mu=0,25$	19/325 (5,8%)	330/420 (78,57%)	66/420 (15,71%)	0,011	0,0022	3,2/40 (8%)

2. táblázat. Egy teljes körülfordulás alatt ébredő maximális feszültségek és nyúlások

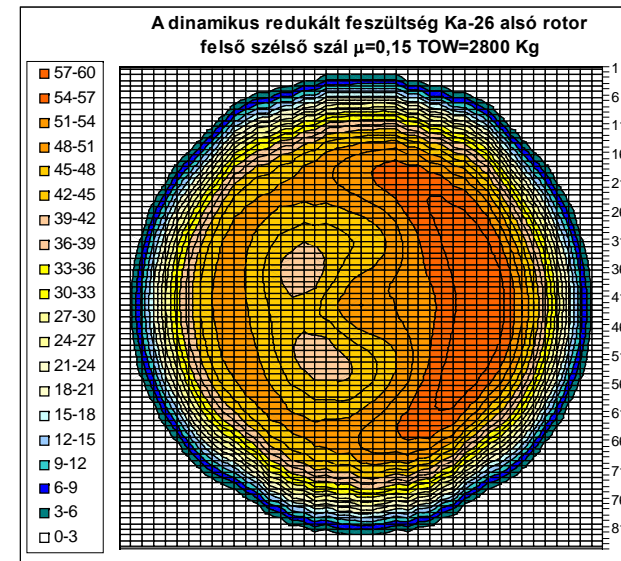
nyírófeszültséget határoztam meg és ezt viszonyítottam a nyírószilárdság értékéhez.

Dinamikus esetben az eredő húzófeszültség az alábbi húzófeszültségek összege: a dinamikus terhelésből meghatározott belső és a centrifugális erő húzása által okozott feszültségek összege. A 2. táblázat szemlélteti a terhelések és alakváltozások viszonyait. Az szerkezeti anyagok szilárdsági tulajdonságainak

forrása a [36] szakirodalom volt. A következő ábrák szemléltetik a statikus és a dinamikus redukált feszültségek eloszlását a rotorsík mentén.



2. ábra. A statikus redukált feszültség eloszlása [MPa]



3. ábra. A dinamikus redukált feszültség eloszlása [MPa]

IV. Tézisgyűjtemény

Munkám során a következő új eredményekre jutottam:

1. Műszaki matematikai modellt dolgoztam ki, amellyel, a koaxiális rotorral ellátott helikopterek aerodinamikai, dinamikai és aeroelasztikus tulajdonságai vizsgálhatók; ezen belül

1.1. Továbbfejlesztettem a helikopter rotorokra alkalmazott impulzus tétel és lapelem elmélet egyesítésén alapuló eljárást (angol elnevezése BEMT - Blade Element Momentum Theory), úgy, hogy alkalmas legyen

- 1.1.1. A koaxiális rotor-rendszer rotorjainak áramcső-keresztmetszetének meghatározására;
- 1.1.2. A kerületi irányú indukált sebesség-komponens számítására;
- 1.1.3. A stacioner szélsatorna kísérletek adatainak instacioner áramlás esetére történő felhasználására;
- 1.1.4. Az alsó rotorlapátok esetén a felső rotor normál és kerületi indukált sebességeinek figyelembe vételére;
- 1.1.5. Az alsó rotorlapátoknál a felső rotorlapátok lapátvég-örvényei által az alsó rotorsíkon indukált sebességek figyelembe vételére;

1.2. A koaxiális rotor-rendszer alsó rotorját érő áramlást két részre bontottam: a szabad megfűvási zónára és a felső rotor által megzavart áramlás zónájára és meghatároztam, hogy a helikopter üzemállapotától függően hogyan alakulnak ezek a zónák. Ehhez a rotorállásszög, és az áramcső hátratólódás ismerete szükséges. A rotorállásszög a Ka-26 típusú helikopter teherplató változatára, TOW=2800kg esetén az alábbi egyenlet szerint változik:

$$\alpha_R = -0,0034((V_\infty+20)/20)^3 - 0,1792((V_\infty+20)/20)^2 + 0,0223(B67+20)/20$$

ahol V_∞ dimenziója km/h. Az áramcső hátratólódás (TOW=2800kg és egyenes vonalú egyenletes repülés esetén) szintén a rotor megfűvási sebességének függvényében az alábbi polinommal számítható:

$$X_{ACS} = 0,0113((V_\infty+20)/20)^4 - 0,234((V_\infty+20)/20)^3 + 1,3829((V_\infty+20)/20)^2 - 1,2922(V_\infty+20)/20$$

1.3. A rotorlapátok merev testként és rugalmas testként végzett mozgását leíró differenciál-egyenlet rendszert összekapcsoltam az előzőekben említett aerodinamikai modellel {erre példa az alsó rotor vizsgálatára alkalmas műszaki matematikai modell számítógépi programja} figyelembe véve az alábbiakat

1.3.1. A rotorlapát csapkodó és csavaró mozgását, mivel a rotorlapátok kapcsolt hajlító-csavaró lengése a helikopter rotorok működésének egyik központi problémája és dinamikai viselkedés korrekt leírása érdekében a csavaró mozgást figyelembe kell venni;

1.3.2. A rotorlapátok hajlító deformációját, mely nagymértékben növeli a számítás pontosságát és alapvető szükség van rá a szilárdsági analízishez;

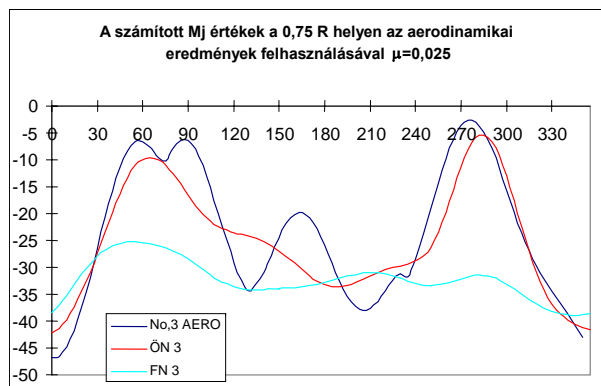
2. A műszaki matematikai modell alapján megvizsgáltam a Ka-26 típusú helikopter alsó rotorjának aerodinamikai viselkedését, ezen belül

2.1. Megállapítottam, hogy az alsó rotorlapátok áramlási viszonyai - a felső rotorlapátok által indukált sebességmező hatására – jelentős mértékben nem változnak;

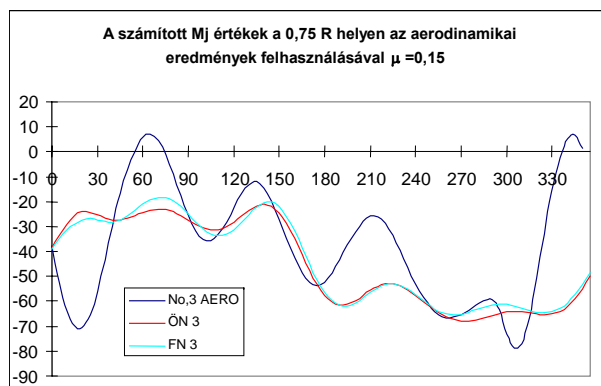
2.2. A felső rotor áramcsövének átmérője és elhelyezkedése változik az üzemmód függvényében és minden üzemmódon van olyan terület az alsó rotorsíkon, melyet nem érint a felső rotor áramcsöve;

2.3. A felső rotor hatásai közül az alsó rotorlapátok terhelése szempontjából közepes sebességeken legjelentősebb a lapátvég-örvényfonalak által indukált sebességek hatása, míg kis sebességeken illetve függeszkedéskor a felső rotor által indukált sebességek hatása jelentősebb. Ugyanakkor a maximális sebességhez közeli tartományban a felső rotor hatása elenyésző. Ezt jól mutatják a 4-6. ábrák, melyek a rotorlapát 0,75 relatív sugarú metszetében (ez megegyezik a mérő-rotorlapát No. 3 metszetével) mutatják a felső rotor hatásait. Az ábrákban alkalmazott jelölések a következőket jelentik:

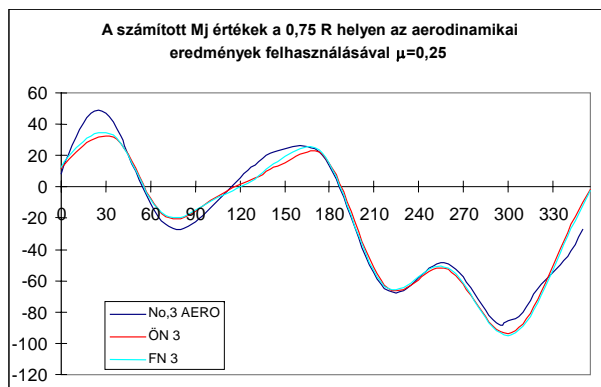
- No. 3 AERO: A modell segítségével számított, a legtöbb hatást figyelembe vevő eredmények;
- ÖN: A modell segítségével a felső lapátvégörvények hatása nélkül számított eredmények;
- FN: A modell segítségével, a felső rotor hatásai nélkül számított eredmények.



4. ábra. A felső rotor hatásai az alsó hajlítónyomatékára kis sebességen



5. ábra. A felső rotor hatásai az alsó hajlítónyomatékára közepes sebességen



6. ábra. A felső rotor hatásai az alsó hajlítónyomatékára nagy sebességen

3. Az 1. tézisben meghatározott műszaki matematikai modellhez kapcsolódó, a rotorlapátok működése közbeni tényleges (dinamikai) terhelések meghatározására alkalmas aerodinamikai-dinamikai modellt dolgoztam ki és alkalmaztam a korábbiakban vizsgált Ka-26 típusú helikopter alsó rotorlapátjaira, ezen belül:

3.1. Megállapítottam az alsó rotorlapátok konkrét statikai (jelen esetben a külső igénybevételek alapján számított hajlító) és dinamikai (jelen esetben a szerkezeti deformációk alapján számított hajlító – tehát a valóságban konkrétan fellépő) terhelését és meghatároztam az ezek alapján adódó redukált feszültségek viszonyát a törő-terheléshez (2. táblázat).

3.2. Megállapítottam az alsó rotorlapátok konkrét deformációs viszonyait és számítottam az ezekhez tartozó maximális redukált feszültségértékeket – ez a dinamikai terhelés, illetve ezt nevezem dinamikus feszültségnek. A 2. táblázat értékeiből jól látható, hogy a külső terhelések alapján meghatározott hajlító igénybevételekből számított, ezért „statikus”-nak nevezett feszültség értékei jóval meghaladják a szerkezetben valójában ébredő dinamikus feszültség értékeit. Ez azt jelenti, hogy a szerkezetnek a valós működési viszonyok között, a terhelések gyors változása miatt egyszerűen nincs ideje arra, hogy felvegye a statikus terheléseknek megfelelő deformált alakot, és ezzel kialakuljon a statikus szemléletnek megfelelő feszültségi állapot. Ez a megállapítás felveti a következőket:

3.2.1. A statikus szemlélet alapján (tekintettel arra, hogy a Ka-26 típusú helikopter rotorlapátjait 1959-ben tervezték és akkor még nem állt rendelkezésre olyan számítástechnikai háttér, amely lehetővé tette volna a dinamikus terhelések meghatározását) tervezett rotorlapátok jelentősen túl vannak méretezve.

3.2.2. A dinamikai terhelések bevezetése, új méretezési határok megállapítását engedi meg, egy gazdaságosabb szerkezeti megoldást, vagy legalább élettartam hosszabbítást téve lehetővé.

3.2.3. Megállapítható, hogy a Ka-26 helikopter rotorlapátjának relatív nyúlás értékei sehol sem haladják meg a 0,004 értéket [37] [38] [39] [40] és ezért pusztán a mechanikai igénybevételeket feltételezve a lapát élettartama tart a végtelenhez. Ennek alapján (az e tárgyban felhalmozott gyakorlati tapasztalatok szerint [41]) a lapátok élettartama a környezeti hatások miatt ugyan nem lehet végtelen, de várható, hogy magas működési időt érnek el. Ezt bizonyítja a jelenlegi élettartam mely 4000 óra és 16 év - az eredetileg meghatározottnak majdnem a duplája. A jövőben,

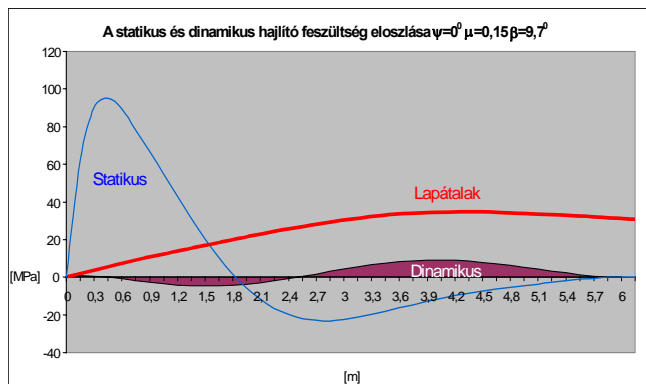
minden bizonnyal további hosszabbításra kerülhet sor, ennek az elvi alapja pontosan a dinamikai terhelések miatti kis deformáció.

3.3. A 7.-8. ábrák alapján megállapítottam a rotorlapátok statikai és dinamikai terhelés szempontjából kritikus keresztmetszeteit, melyek a következők:

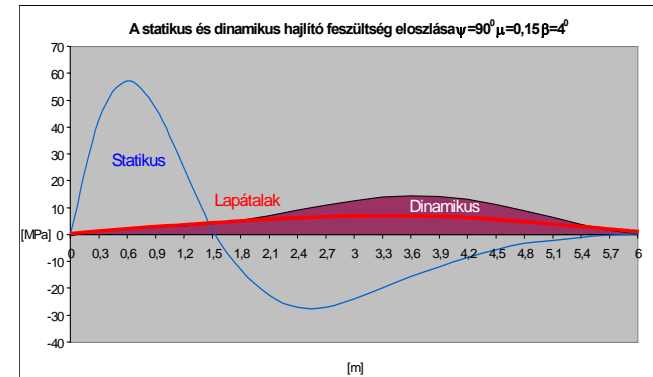
3.3.1. Statikai hajlító terhelés szempontjából kritikus keresztmetszetnek a tőtől 0,3-0,6 m és a 2,1-2,7 m távolságra lévő szakaszok minősülnek;

3.3.2. Dinamikai hajlító terhelés szempontjából kritikus keresztmetszetnek a tőtől 1,5-1,8 m és 3,9-4,4 m távolságra lévő szakaszok minősülnek – ezt, az általam kifejlesztett számítási eljárás alapján megállapítást megerősíti [42], ahol pontosan a jelen pontban megadott keresztmetszeteket minősítik kritikusnak.

3.3.3. Mind a statikai, mind a dinamikai szemlélet alapján meghatározott redukált feszültségeket alapul véve megállapítható, hogy a centrifugális húzóterhelés miatt a lapáttő mindkét esetben kritikus keresztmetszetnek minősül.



7. ábra. A lapátalak és feszültség eloszlás azimutális metszetei



8. ábra. A lapátalak és feszültség eloszlás azimutális metszetei

V. Szakirodalmi tevékenység

A tézisek témakörében a következő publikációim születtek:

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk:

1. Szilágyi D, „Rotorcraft Aviation Today in Hungary” *Transactions of The Institute of Aviation Scientific Quarterly 1-2/2002 (168-169)* pp. 23-24. Institute of Aviation, Warsaw 2002.

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadás:

2. D. Szilágyi, “Rotor blade air loads determination on the base of structural deformation” II. Avionics Conference Poland, Jawor 1998. 09. 09-12. Bieszczyca '98 Poland 1998.
3. D. Szilágyi, „Aerodynamic Investigation of the Coaxial Rotor System” Proceedings of the 7th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies pp. 473-480 Faculty of Transportation Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Budapest 2001.
4. D. Szilágyi, “Aerodynamic Investigation of Coaxial Rotor System” *Mechanica Awionika NR 186 Tom 1* pp. 261-269. Rzeszow (Poland) 2001.

Magyar nyelvű folyóiratcikk:

5. Szilágyi D, „Koaxiális Rotorok Aerodinamikai Vizsgálata”. *GÉP folyóirat* 2001/8 sz. pp 19-23 GTE Budapest, 2001.

Magyar nyelvű konferencia előadás:

6. Szilágyi D, „Rotorlapát légerőterhelésének meghatározása a szerkezeti deformációk alapján” XIV. Magyar Repüléstudományi Napok Szolnok,

ZMNE RTI 1998. 04. 18. Repüléstudomány Közlemények X. évfolyam 24. szám pp. 165-173 ZMNE Szolnok 1998.

7. Szilágyi D, „Rotorlapátok légerőterhelésének meghatározásához szükséges adatok méréssel történő meghatározása” XVII. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, ZMNE RTI 2000. 04. 15. Repüléstudomány Közlemények XII. évfolyam 29. szám pp. 165-173 ZMNE Szolnok 2000.

8. Szilágyi D, „Koaxiális Rotorok Aerodinamikai Vizsgálata” XVIII. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, ZMNE-RTI 2001. 04. 21. Repüléstudomány Közlemények Különszám I. pp. 157-163. ZMNE Szolnok 2001.

9. Szilágyi D, „Koaxiális Rotorok Aerodinamikai Modellézése” A Katonai Rendszerek Repülőgépei, a Katonai Repülőgépek Rendszerei c. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, ZMNE-RTI 2003. 04. 04. CD-ROM ZMNE Szolnok 2003.

Nem publikációértékű munkák:

Szilágyi D, „Rotorlapátok Légerőterheléseinek Dinamikai Vizsgálata” poszter MTA AMB 1999. évi Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Gödöllő 1999. 01. 25. Dr. Gausz T.-Szilágyi D, „Aerodynamic Loads of Helicopter Rotor Blades” 3th International Conference of Unconventional Flight Siófok 2001.09.12.-14.

A tézisfűzetben hivatkozott irodalmak

- [1] Lindert, H.W.: Flugmessungen mit dem Hubschrauber Ka-26 im Oktober 1990. Institut für Lichtbau RWTH-Aachen 1992.
- [2] Gausz, T.: Helicopter Rotors Aerodynamics and Dynamics. 5th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, 1996.
- [3] Szilágyi, D.: Rotor Blade Air Load Determination on the Base of Structural Deformation. 2nd Avionics Conference, Bieszczady 98' Jawor, Poland 1998.
- [4] Мартынова, А. К.: Экспериментальные Исследования по Аэродинамике Вертолета Машиностроение Москва 1980.
- [5] Norman, T. R.- Shinoda, P. M.: Low-Speed Wind Tunnel Investigation of a Full-Scale UH-60 Rotor System. Presented at the AHS 58th Annual Forum, Montreal, Canada, June 11-13, 2002.
- [6] Миль, М. Л.: Вертолеты расчет и проектирование 1 Аеродинамика Машиностроение Москва 1966.

-
- [7] Glauert, H.: On Horizontal Flight of a Helicopter. R&M No. 1157, 1928
 - [8] Stepniewsky, W. Z.- Keys, C. N.: Rotary-Wing Aerodynamics. Dover Publications, Inc., New York 1984.
 - [9] Krothapalli, K. R.: Helicopter Rotor Dynamic Inflow Modeling for Maneuvering Flight. Ph.D. Thesis Georgia Institute of Technology 1998.
 - [10] Mangler, K. W.- Squire, H. B.: The Induced Velocity Field of a Rotor. R&M No. 2642, 1950.
 - [11] Gausz, T.: Helikopterek. BME Mérnöktovábbképző Intézet Budapest, 1982.
 - [12] Kinner, W.: Theory of Circular Wing. Ingenieur Archiv, Vol. 7, Translation No. 2345. Ministry of Aircraft Production, United Kingdom, 1937.
 - [13] Pitt, D.M.- Peters, D.A.: Theoretical Prediction of Dynamic Inflow Derivatives. Vertica, Vol. 5, No. 1, pp. 21-34, 1981.
 - [14] Gray, R. B.- Brown, G. W.: A Vortex-Wake Analysis of a Single-Bladed Hovering Rotor and a Comparison with Experimental Data. AGARD-CPP 111, 1972.
 - [15] Ormiston, R. A.: An Actuator Disc Theory for Rotor Wake Induced Velocities. AGARD-CPP 111, 1972.
 - [16] Baskin, V. Ye.-Vildgrube, L. S.- Vozhdayey, Ye. S.- Maykapar, G. I.: Theory of Lifting Airscrews. NASA TTF-823, 1975
 - [17] Landgrebe, A. J.- Marvin, C. J.: Rotor Wakes – Key to Performance Predictions. AGARD-CPP 111, 1972.
 - [18] Landgrebe, A. J.: An Analytical and Experimental Investigation of Helicopter Rotor Hover Performance and Wake Geometry Characteristics. USAAMRDL Technical Report 24-71, 1971.
 - [19] Jenny, D. S.- Olson, J. R.- Landgrebe, A. J.: A Reassessment of Rotor Hovering Performance Prediction Methods. Journal of the AHS, Vol. 13, No. 2, 1968.

-
- [20] Erikson, J. D.- Ordway, D. E.: A Theory for Static Propeller Performance. CAL/USAAVLABS Symposium Proceedings, Vol. 1, 1966.
- [21] Magee, J. P.- Maisel, M. D.- Davenport, F. J.: The Design and Performance Prediction of a Propeller/Rotor for VTOL Applications. Proceedings of the 25th Annual AHS Forum, No. 325, 1969.
- [22] Brady, W. G.- Crimi, P.: Representation of Propeller Wakes by Systems of Finite Core Vortices. CAL Report No. BB-165-1-2, 1965.
- [23] Sadler, G. S.: Development and Application of a Method for Predicting Rotor Free Wake Position and Resulting Rotor Blade Air Loads. NACA CR-1911, Vols. I and II., 1971.
- [24] Scheiman, J.- Ludi, L. H.: Quantitative Evaluation of Effect of Helicopter Rotor-Blade Tip Vortex on Blade Airloads. NASA TN D-1637, 1963.
- [25] Surendraiah, M.: An Experimental Study of Rotor Blade-Vortex Interaction. NASA CR-1573, 1970.
- [26] Ham, N. D.: Some Conclusions from an Investigation of Blade-Vortex Interaction. Journal of the AHS, Vol. 20, No. 4, 1975.
- [27] Landgrebe, A. J.- Moffit, R. C.- Clark, D. R.: Aerodynamic Technology for Advanced Rotorcraft. Journal of the AHS, Vol. 22, Part I, No. 2, 1977.
- [28] Barocela, E.: The Effect of Wake Distortion on Dynamic Inflow for Lifting Rotors. Master of Science Thesis, School of Mechanical Engineering, Washington University, St. Louis, Missouri, 1997.
- [29] Kocurek, J.D.- Berkowitz, L.F.- Harris, F.D.: Hover Performance Methodology at Bell Helicopter Textron. Proceedings of the 36th Annual Forum of the AHS Washington, D.C., 1990.
- [30] Azuma, A.- Kawachi, K.: Local Momentum Theory and its Application to the Rotary Wing. AIAA Paper 75-865, 1975.
- [31] Nyéki, L.-Nagy, T.: Turbo Basic LSI Oktatóközpont Budapest, 1991.

-
- [32] Szilágyi, D.: Rotorlapátok Légerőterheléseinek Dinamikai Vizsgálata poszter MTA AMB 1999. évi Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Gödöllő GATE 1999. 01. 25.
- [33] Szilágyi, D.: Rotorlapátok légerőterhelésének meghatározásához szükséges adatok méréssel történő meghatározása. XVII. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, 2000.
- [34] Bornstein, I. N.- Szemengyajev, K. A.: Matematikai Zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [35] Sályi, B. Dr.: Mechanika Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [36] Н. Ф. Суриков, Г. И. Иоффе, А. А. Дмитриев, Е. Г. Пак.: Вертолет Ка-26. Транспорт, 1982.
- [37] P.T. Curtis, A.J. Davies: European Conference on Composite Materials ECCM-9, 4.-7. Juni 2000, Brighton U.K.
- [38] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, W.L. Morris, G. Flintoff: Acta Metallurgica et Materialia (1994)
- [39] S.D. Pandita, G. Huysmans, M. Wevers, I. Verpoest: TexComp 5, 5th International Conference on Textile Composites, 18.-20. Sept. 2000, Leuven, Belgien.
- [40] B. Graftieaux, A. Rezai, I. Partridge: European Conference on Composite Materials ECCM-9, 4.-7. Juni 2000, Brighton U.K.
- [41] Polgári Légiközlekedési Hatóság: A Ka-26 típusú helikopter üzemidős utasítása, 2002/R03 sz. direktíva, Budapest 2002
- [42] Megyery, M.: Ka-26 helikopter műszaki üzemeltetési utasítás, Repülőgépes Szolgálat, Budapest, 1976

.....
Szilágyi Dénes

Budapest, 2003-10-01