

Szilágyi Dénes

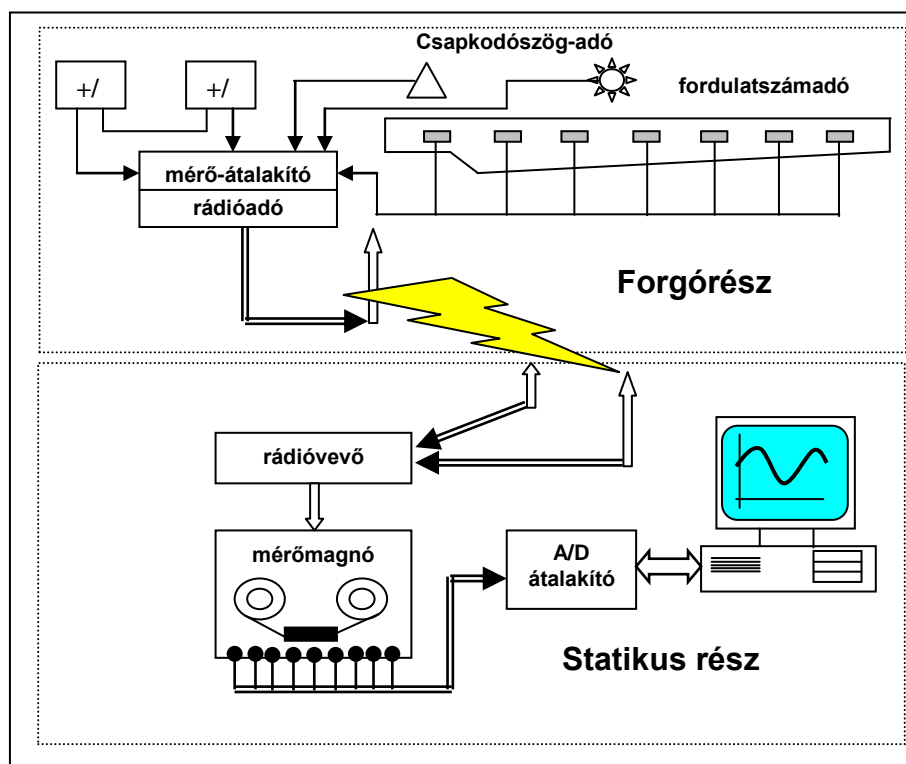
ROTORLAPÁTOK LÉGERŐTEHELÉSÉNEK MEGHATÁROZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES ADATOK MÉRÉSEL TÖRTÉNŐ MEGHATÁROZÁSA

Egy helikopter fő- és farkrotor rendszerének rotorlapátjait az elrendezés alapján és a különféle repülési manőverek miatt nagyszámú instacionárius terhelés éri. Jelentősek a lapátörvény kölcsönhatások és nem tengelyirányú megfűvás esetén a rotorlapát változó térbeli helyzete miatt állandóan változó irányú és nagyságú megfűvást kap. Mindezek hatására a rotorlapátot egy térben és időben erősen változó megoszló légerőterhelés éri, mely hatására deformálódik, s így visszahat a légerőkre, módosítván azokat. Látható, hogy a rotorlapáton ébredő légerőterhelés térbeli és időbeli alakulását aerodinamikai oldalról pusztán feltételezések, matematikai módszerek segítségével számíthatjuk. Szerkezeti oldalról, mérésekkel alátámasztottan megközelítve a kérdést, jóval egyszerűbb és pontosságát tekintve kielégítő módszer létezik a rotorlapátot terhelő légerők geometriai és időbeli lefutásának meghatározására [8].

A MÉRŐRENDSZER LEÍRÁSA

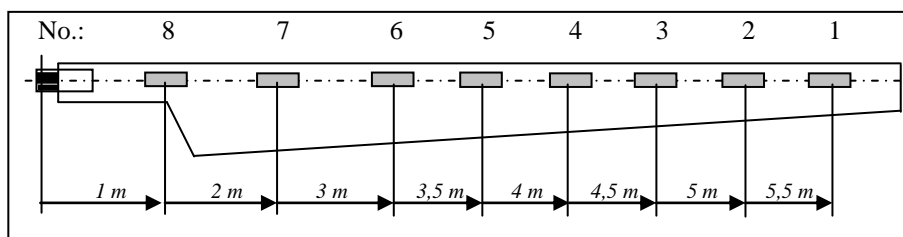
A rotorlapátok szerkezeti deformációinak mérésére repülés közben a legalkalmasabbnak a telemetrikus rendszer kínálkozik. Az ilyen rendszerek két jól elkülöníthető részre oszlanak: az egyik a forgó rész, a másik a statikus (1. ábra). A forgó rész tartalmazza a mérő-rotorlapátot, a csapkodószögadót, a fordulatszámadót, a mérő-átalakítót, a rádióadót, az antennát, és a feszültségforrásokat. Mindezek a rotoragyon kaptak helyet. A rendszer statikus része a földön elhelyezett antennából, a vevőkészülékből, az adatrögzítőből, a jelátalakítóból, és a kiértékelő számítógépből állt. A mérő-rotorlapátra 8 aktív nyúlásmérő-bélyegpárt ragasztottak az érzékenység növelésére az egyes mérőhelyeken a húrnegyedeket összekötő vonalban a 2. ábrának megfelelően a lapát alsó és felső kontúrján.

A bélyegek a kereskedelmi forgalomban is kapható egytengelyű — mivel itt tisztán húzás és nyomás van — 250 Ω -os 6 mm x 12 mm-es kivitelűek voltak. A bélyeg-párokat összekötő huzalok az alsó lapátoldal utolsó harmadában lettek kivezetve a lapáttőig, és félhíd kapcsolással lettek bekötve a mérő-átalakítóba, amely bélyegpáronkénti félhídkapcsolás volt [4].



1. ábra

A bélyegek és a drótok speciális ragasztóval lettek rögzítve és fémfólia szalaggal lefedve. Így a lapát szerkezeti és aerodinamikai tulajdonságait nem befolyásolták, és az elektromos zavarvédelem is megoldódott, mivel a bélyegek külön szimmetrikus középleágazásos kapcsolásúak voltak. A zavarvédelem nagyon fontos, főleg a telemetrikus rendszer saját rádióadása, ill. a repüléssel kapcsolatos kommunikációs rádióadások hatása miatt.



2. ábra

A helikopter energia- és gyújtásrendszerei ebből a szempontból elhanyagolhatóak azok megfelelő árnyékolása miatt. A mérés megkezdése előtt szükség volt a lapát tömeg és z tengely menti hajlító-merevség mérésére. Ezt törőállványba fogott lapáton 0,5 m-es szakaszonként végezték el. A merevségértékeket lineárpotencióméterek és Huggenberger-féle tenzométerek segítségével, etalon terhelések felvitelekor bekövetkezett lehajlások mérésével határozták meg. Ezek a merevségértékek a centrifugális erő merevítő hatása nélküliek, melynek hatását a számítás későbbi fázisában egy külön taggal kellett figyelembe venni. A tömegeloszlás értékeket úgy határozták meg, hogy az egyes szakaszok tömegértékeit a szakaszok tömegközéppontjaiba redukálták. A mérési eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

R [m]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
x [m]	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
IE [Nm ²]	3.58e5	53240	33216	12544	9696	7716	6350	4866	3872	2976	2157
M [kg]	6	3.1	1.716	1.734	1.691	1.504	1.561	1.654	1.956	1.82	1.644
M' [kg/m]	12	6.2	3.432	3.468	3.382	3.008	3.122	3.308	3.912	3.64	3.288

Ez közelítés, de az egyes szakaszokon meghatározott tömegértékekre illesztett $m(x)$ tömegeloszlás függvényt — a lapát mentén integrálva az a lapát teljes 25,38 kg-os tömegétől alig eltérő 24,63 kg-os értéket adott, mely eltérést nyugodtan tekinthetünk elhanyagolhatónak. A számítások során a merevségértékekre az előzőhöz hasonló módon — köbös Spline alkalmazása a MATLAB POLIFIT programcsomagból — illesztett merevségeloszlás-függvényt illesztettünk. A nyúlásmérő bélyegeket egységnyi hajlítónyomaték értékekre kalibrálva, a hajlító merevségértékeket az adott mérőhelyen ismerve, a bélyegekről jövő feszültségértékeket be lehet helyettesíteni a rugalmas szál differenciál egyenletébe (1), és így az adott mérési helyen az elmozdulás második deriváltjával azonos értéket kapunk:

$$\frac{M(x, t)}{IE(x)} = Y''(x, t) \quad (1)$$

Az $Y''(x, t)$ értékekből kiindulva határozható meg a rotorlapáton működő légerendszer térbeli és időbeli lefutása.

Ezeknek a jeleknek a kiértékeléséhez szükség van a csapkodószög és az azimuttszög pontos ismeretére is. A csapkodási-szög adó egy rugóacéllapra felragasztott nyúlásmérőbélyeg volt, és úgy volt felszerelve a csapkodócsuklóra, hogy csapkodó mozgás esetén deformálódjon. A környezeti hatásoktól ez is

fóliás árnyékolással volt védve. Az adó a hitelesítés során a csapkodószöggel arányos jelet adott $\pm 0,25^\circ$ pontossággal. Az azimutszögadó a dőlésautomata külső (forgó) elhelyezett mikrokapcsolóból és a belső (álló) gyűrűn elhelyezett a kapcsolót működtető acélbütyökből állt. Ez így egy négyszögjelet adott minden körülfordulás után, és a hitelesítés során a pontossága $\pm 1^\circ$ tartományon belül adódott. Itt a zavarvédelem nem szükséges, mivel ez A1 üzemmódnak felel meg.

Az egész telemetrikus mérőrendszer következő s egyben legfontosabb elemei a rádióadó és -vevő. A mérési eredmények értékelhetősége szempontjából nagyon fontos volt, hogy a jelek lehetőleg 1° -os azimutszög ugrásonként rendelkezésre álljanak, és a lapát hossza mentén az egyes mérőhelyek jelei között ne legyen időkülönbség. Ezt és a rotor maximálisan 5 Hz-es forgási frekvenciáját alapul véve elegendőnek bizonyult az A/D átalakítás során 0,0005 s időközönkénti mintavétel. A jelek átalakítására és lesugárzására a legcélszerűbbnek a független FM csatornás rádióadó bizonyult. Így egy azimutszög értékhez tartózan meg lehetett kapni a nyúlásmérőbélyegek, a csapkodószög, és a fordulat-számadó jeleit (2. táblázat).

2. táblázat

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-7.018	-11.80	-45.37	-43.99	-46.96	-40.52	33.52	3.751	-.3080
-7.178	-9.779	-44.52	-47.48	-46.47	-39.92	35.35	3.528	-.2880
-8.046	-10.68	-43.37	-28.71	-44.10	-41.18	39.12	3.251	-.2980

Megjegyzés: Az első hét oszlop tartalmazza a nyúlásmérőbélyegektől jövő jeleket. A 8. oszlop a csapkodószögadó, a 9. pedig az azimutszögadó négyszögjeleit tartalmazza.

A zavarvédelem szempontjából az egész rendszerben ez a leggyengébb láncszem. Gondot kellett fordítani a tápfeszültség szűrésére, és a keskenysávú kimenet biztosítására. A kimenetet a legcélszerűbb megoldani lineáris üzemmódu A vagy AB osztályú végfokkal, és természetesen hangolt antennával. Az antenna karakterisztika és a jelerősség miatt célszerű a mérési mező szélső pontjainak közelében több vevőantennát alkalmazni. A vételi oldalon szintén meg kellett valósítani a tápfeszültség szűrését, és a bejövő jelek nagy szelektivitású sávszűrőkkel való szétválasztását.

Az így bejövő szétválasztott jeleket ezután egy mérőmagnón rögzítették szabvány FM modulálással. A mérőmagnó zavarvédelme a szabványoknak és a mérés követelményeinek megfelelő volt.

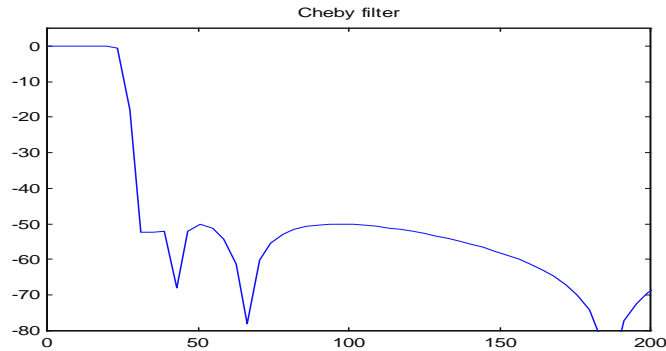
A következő lépés a rögzített analóg jelek A/D átalakítása és rögzítése volt a könnyebb feldolgozhatóság érdekében. Itt a mintavételezés frekvenciája megegyezett a fentebb említett frekvenciával, és kielégítette a sávszűrt jelek minta-

vételezési frekvencia növekedését is [1]. Ez a frekvencia a rotor maximális forgási frekvenciájának a 360-szorosa, és a motorok forgási frekvenciájának pedig a 36-szorosa, így jóval nagyobb, mint az analóg jelek változásainak várható frekvenciája. A pontosság 1 mV nagyságrendű volt 0—10 V között, és 10 mV 10 V fölötti értékeknél. Ehhez 12 bites felbontásra volt szükség [2]. A mintavételezés szabályos volt, melynek csillapítás-torzítása a nem 0 értékű mintaközi időrés miatt az $f_A=2000$ Hz, $\tau = 4,1667$ s értékekre 0,0994 dB értékű volt [1]. A mintavevő és tartó üzemmódok közötti váltáshoz szükséges idő instabilitása által keltett dzsitterzaj az alkalmazott kristályvezérléses mintavételezés esetén elhanyagolható (mintegy 10^{-6} nagyságrendű zaj/jel viszony) [1]. Az A/D átalakításhoz a fentieknek megfelelően 12 bites fixpontos bináris kódolás lett alkalmazva. Ebben a fázisban — ahogy az később látható lesz — legnagyobb hibát az amplitúdó kvantálási zaj jelentette, ahogy az a 3. ábrán is jól látható. A jel/zaj viszonyt ilyen típusú átalakítók esetére [1] alapján 65 dB értékűre adódik. A fixpontos bináris kódolás csonkítási hibájáról sem szabad elfelejtkezni, amely ebben az esetben pozitív számokra $-2^{-B} < E_T \leq 0$, és negatív számokra $0 \leq E_T < 2^{-B}$ értékűre adódik [1]. A kerekítési hiba tetszőleges előjelű fixpontos kódolású számra $-0,5 \cdot 2^{-B} \leq E_R \leq 0,5 \cdot 2^{-B}$ [1] alapján. Az így rögzített mérési eredmény file-ok egyikének részletét mutatja a 2. táblázat. A file-ok hosszúságát korlátozta a rádióadó max. 250 m-es hatósugara, mely limitálta a mérési mező hosszúságát. Ez végül is nem jelentett gondot, mivel még a nagysebességű áthúzások alkalmával is sikerült rögzíteni 9 teljes rotorfordulatra való jelet. Ez azt is jelenti, hogy az aliasing problémáktól eltekinthetünk, mivel a mintavételi időablak T_F időszelése az alapprofrendencia T_0 periódusidejének a többszöröse, és ezért az időablak spektrális komponensei eltűnnek [2].

MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

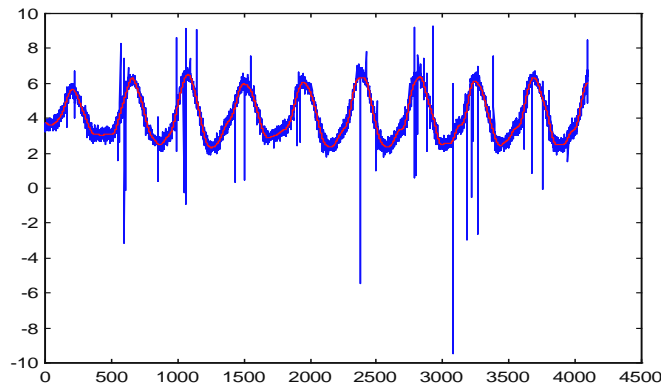
A fentiekből is következik, hogy a mérés során sok lehetőség adódott a hibák keletkezésére. A mérés során keletkezett hibákat két fő csoportba lehet sorolni. Az első csoportba tartoznak a rendszeres hibák. Ezek kiküszöbölése viszonylag egyszerűbb, mivel ehhez rendszeres hitelesítésre van szükség, mely hitelesítést természetesen minden mérés előtt és után is elvégezték. A másik csoportba tartoznak a véletlen hibák, melyek alapvetően a környezeti hatások (hőmérsékletváltozás, elektromágneses terek, mechanikai hibák) számlájára írhatóak. Az ezek elleni védekezés a mérőrendszer elemeinek helyes kiválasztásával, gondos előkészítéssel (lásd előző fejezetet), pontos végrehajtással és nagyszámú méréssel valósítható meg. De mivel a hatásukat legfeljebb becsülni tudjuk, ezért fontos a mérési eredmények utólagos szűrése és elemzése. Erre a legcélszerűbb adatbá-

zísznak a párnahatás nélküli függeszkedés csapkodószög csatornájának jelei ígérkeztek, mivel ez a legegyszerűbb üzemállapot, és ebből a csapkodószög értékek a legkönnyebben visszaellenőrizhetők.



3. ábra

Az eredmények szűréséhez a MATLAB programcsomagból a kétpólusú Csebisev szűrőt választottam, mivel [1] és [2] szerint is ez az egyik legkisebb torzítást okozó eljárás. A 3. ábrán látható a szűrő karakterisztikája melyet a szűrőtervező program rajzolt fel. A szűrő jellemzői: a frekvencia mintavételezési pontok száma $N = 10$; az áteresztő tartomány 0—30 Hz (az alaphfrekvencia 6. felharmonikusáig, a forgási kúphoz viszonyított, a főleg a lapát deformációkból származó elmozdulások miatt); a csillapítás ebben a tartományban 0 dB, ami természetesen idealizált; a zárófrekvencia 35 Hz; és itt a csillapítás -50 dB. A szűretlen és a szűrt jeleket mutatja a 4. ábra.



4. ábra

Az ilyenformán megszűrt mérési eredményeket a továbbiakban a felhasználhatóság szempontjából értékelni kellett.

Ehhez legmegfelelőbbnek a csapkodószöveget leíró mozgásegyenlet paramétereinek azonosítása ígérkezett. A csapkodószöveget az azimutszög függvényében [5] alapján az alábbi összefüggéssel lehet felírni:

$$\beta(t) = a_0 + a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t + a_2 \sin 2\omega t + b_2 \cos 2\omega t + \dots \quad (2)$$

A fenti összefüggésből a másod és magasabbrendű tagokat az egyszerűség kedvéért elhanyagolva, a legkisebb négyzetes eltérés elve alapján — mivel a csapkodószögadó 1° értékre volt kalibrálva — a $\beta(i)$ értékhez meghatározhatóak az a_0 ; a_1 ; b_1 paraméterek. Ehhez még szükség volt a korrekt forgási szögsebesség értékre. Ezt az impulzusszámláló négyyszögjelének elemzésével lehet megkapni. Az elemzés során 432 minta adódott minden körülfordulásra, amely a $\Delta t = 0,0005$ s időlépések ismeretében $\omega = 29,08882$ 1/s szögsebesség értéknek felel meg. Ismerve a rotortengely beépítési szögét (6° előre a szimmetriasíkban) ebből következtetni lehet a jelenlegi üzemiállapot — mely függeszkedés párnahatás nélkül — figyelembevételével a paraméterek és ezáltal a mérési eredmények helyességére. A közelítés összefüggéseit mellőzve a végeredmények: $a_0 = 4,10964^\circ$; $a_1 = 11,01726^\circ$; $b_1 = 2,82174e-4^\circ \approx 0^\circ$. Ezek az értékek megfelelnek a tapasztalatoknak, és a [9]-ben szereplő, hasonló üzemiállapotra vonatkozóan a diagramokból ki-vehető értékeknek.

Végeredményben kijelenthető, 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.

FELHASZNÁLT IRODALMAK

- [1] DR. SIMONYI ERNŐ: Digitális szűrők. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [2] NORBERT HESSELMANN: Digitális jelfeldolgozás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [3] KLAUS BEUTH—OLAF BEUTH: III. Digitális áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1994.
- [4] DR. BOROS SÁNDOR: Villamos mérések a gépészetben. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- [5] DR. GAUSZ TAMÁS: Helikopterek. Műegyetemi Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [6] DR. ROHÁCS JÓZSEF—SIMON ISTVÁN: Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
- [7] I. N. BRONSTEJN—K. A. SZEMENDJAJEV: Matematikai zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [8] RÁCZ—VARGA—VARGA: Repülőgépek szerkezete és szilárdsága. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
- [9] VARGA PÁL: A Ka—26 típusú helikopter gyakorlati aerodinamikája. Repülőgépes Szolgálat, Budapest, 1978.
- [10] DR. KURUCZ KÁROLY: Szabályozástechnika. Műegyetemi Könyvkiadó, Budapest, 1993.