

Rotorlapát légerőterhelésének meghatározása a szerkezeti deformációk alapján

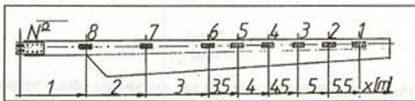
Szilágyi Dénes tanszéki mérnök
GATE Mezőgazdasági Főiskolai Kar Nyíregyháza
Repülő Műszaki és Kiképzési Tanszék

A rotorlapátot terhelő megoszló légerőterhelés meghatározása aerodinamikai sítón rendkívüli nehézségekbe ütközik. Abban az esetben ha a rotorlapát szerkezeti paramétereit ismerjük és a szerkezeti deformációkat repülés közben mérjük meghatározható a rotorlapát általános deformált alakja, melynek segítségével meghatározható a rotorlapátot terhelő megoszló légerőrendszer tetszőleges azimut helyzetében és a lapát hossza mentén tetszőleges finomsággal. Erről szól ez a munka.

1. Bevezetés

Egy helikopter fő- és farkrotorrendszerének rotorlapátjait az elrendezés alapján és a különféle repülési manőverek miatt nagyszámú instacionárius terhelés éri. Jelentősek a lapát-örvény 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 alátámasztottam megközelítve a kérdést jóval egyszerűbb és pontosságát tekintve kielégítő módszer létezik, a rotorlapátot terhelő légerők geometriai és időbeli lefutásának meghatározására. Erről szól ez a munka.

A munka alapját az Acheni Műszaki Egyetem Könnyűszerkezetek Tanszékén



1. ábra.

kifejlesztett módszer adja, mely lehetővé teszi a rotorlapátok szerkezeti reakcióinak (helyi deformációk, gyorsulások) repülés közbeni mérését. Amennyiben ismertek a lapát szerkezeti paraméterei (tömegeloszlás, merevség-eloszlás, saját lengésképek, és sajátfrekvenciák), úgy egyszerű szilárdsági és dinamikai összefüggésekkel meghatározható a légerőterhelés térbeli és időbeli eloszlása. A lapáton elhelyezett egységnyi hajlítónyomatékra kalibrált nyúlásmérő bélyegek (1. ábra) által szolgáltatott jelek arányban vannak a lapáton ébredő nyomatékmetszések nagyságával. A rotorlapát szerkezeti paraméterei laboratóriumban lettek meghatározva (2. ábra). A merevségmérés során rotorlapát z tengely menti hajlítómerevségértékeit határozták meg lineár- potenciométe-

R [m]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
x [m]	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
IE [Nm ²]	3.58e5	53240	33216	12544	9696	7716	6350	4866	3872	2976	2137	1568	1267
m [kg]	6	3.1	1.716	1.734	1.691	1.504	1.361	1.654	1.956	1.82	1.644	1.853	1.118
m' [kg/m]	12	6.2	3.432	3.468	3.382	3.008	3.122	3.308	3.912	3.64	3.288	3.67	2.236

2. ábra.

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

Az első hét oszlop tartalmazza a nyúlásmérőbélyegektől jövő jeleket. A 8. Oszlop a csapkodásiszög-adó a 9. pedig az azimutuszög-adó négyzójelait tartalmazza.

3. ábra.

rek és Huggenberger-féle tenzométerek felhasználásával 0.5 méteres szakaszonként. A bélyegek által szolgáltatott jeleket a rugalmas szál differenciálegyenletébe helyettesítve az adott helyen az elmozdulás második deriváltjával azonos értékeket kapunk. A tömegeloszlás értékeit szintén 0.5 méteres szakaszonként határozták meg oly módon, hogy az egyes szakaszok tömegét a szakasz felezőpontjába mint tömegközéppontba redukálták. A nyúlásmérőbélyegektől kapott jeleket (3. ábra) behelyettesíthetjük a rugalmas szál differenciál egyenletébe (1.1) és így az adott mérési helyen az elmozdulás második deriváltjával azonos értéket kapunk:

$$\frac{M(x,t)}{IE(x)} = Y''(x,t) \quad (1.1)$$

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

2.A mérési eredmények feldolgozásának lépései.

(Az "i" az egyes mérőhelyek számát jelöli)

2.1.

A mérési eredmények ellenőrzése Fourier-analízissel mivel ezek 2π szerint periodikusnak tekinthetők. Egy 2π szerint periodikus n elemű pontthalmazt előállíthatunk a következő egyenlettel:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (2.1.1)$$

A gyakorlatban megelégszünk m db harmonikus összetevővel és a változót $x = \frac{\pi}{T}t$ módon definiálva a Fourier-sor egyúthatói:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$a_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos jx \quad \text{itt } j=1, 2, \dots, m < (n/2)-1. \quad (2.1.2)$$

$$b_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin jx$$

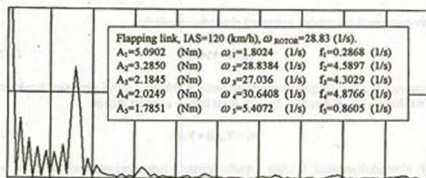
Ezekkel rendelkezésünkre áll a:

$$y(x) = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cos \left[j \frac{\pi}{T} t \right] + \sum_{j=1}^m b_j \sin \left[j \frac{\pi}{T} t \right] \quad (2.1.3)$$

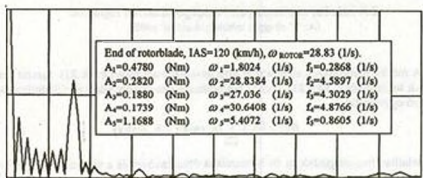
függvény. Az egyes egyúthatókhoz tartozó frekvenciák, amplitúdók, és fáziszögek:

$$\omega_j = j \frac{\pi}{T}; f_j = \frac{j}{2\pi}; A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}; \varphi_j = \text{Arctg} \frac{a_j}{b_j} \quad (2.1.4)$$

A (4.ábra) mutatja a Fourier-analízis eredményeit. Az ábrában látható az 5 legnagyobb amplitúdójú összetevő amplitúdója és frekvenciája.



4a.ábra



4.b.ábra.

2.2.

Az $Y(i)$ helyi elmozdulásértékek meghatározása az egyes mérőhelyeken -adott időben- az $Y'(x,t)$ értékek kétszeres grafikus integrálásával, figyelembe véve a rotorlapát csapkodómozgását is:

$$\frac{M(i)}{IE(i)} = Y'(i) \text{ itt } \frac{\partial^2}{\partial x^2} Y(i) = Y''(i). \quad (2.2.1)$$

Az $Y(i)$ értékek első deriváltja a mérőhelyeken:

$$\frac{\frac{M(i)}{IE(i)} + \frac{M(i+1)}{IE(i+1)}}{2} = (X_i - X_{i-1}) = Y'_D(i) \quad (2.2.2)$$

Itt X_i az egyes mérőhelyek és a lapátbekötés közötti távolság. Az $Y(i)$ értékek deformációból származó része:

$$\frac{Y'(i) + Y'(i+1)}{2} (X_i - X_{i-1}) = Y_D(i) \quad (2.2.3)$$

A merev-test-szerű mozgásból származó elmozdulásértékek:

$$Y_M(i) = I \cdot \sin \beta_i \quad (2.2.4)$$

Itt I a csapkodócsukló tengelyvonala és az i -edik mérőhely közötti távolság. Ezekkel az egyenletekkel az $Y(i)$ elmozdulásértékek adott helyen és adott időben:

$$Y_i = Y_M(i) + Y_D(i) \quad (2.2.5)$$

Az $Y(i)$ elmozdulásértékek 8 teljes rotorfordulatra lettek meghatározva $dt=0.002$ s-os időlépésekkel, ami megfelel $\Delta\psi=3.3^\circ$ -os azinutszöglépésnek. Az (5.ábra) mutatja az

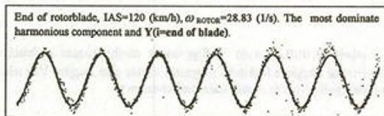
integrálás eredményeit $t=0$ időpontban. A 8 teljes rotorfordulat esetére 872 eredmény sor adódik.

Nr. of measureplaces	Time:0 sec (Now is begining the measurement) [m]
By the flapping link	0
1.	2.846962958574295E-002
2.	5.755054495071411E-002
3.	8.623044937849045E-002
4.	0.12313668473815918
5.	0.13250684738159183
6.	0.13913758099079131
By the end of blade.	0.14331369102001192

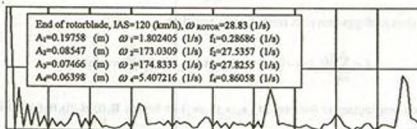
5.ábra

2.3.

Az $Y(i)$ elmozdulásértékek ellenőrzése Fourier-analízis segítségével (7.ábra) valamint az így kapott legdominánsabb harmonikus összetevő és az $Y(i)$ elmozdulásértékek grafikus összevontítása melyet a (6. ábra) mutat.



6.ábra.



7.ábra.

2.4.

Az adott időpillanatban és mérőhelyeken számított $Y(i)$ elmozdulásértékekhez az első három saját lengéskép ($\Phi_j(x)$ $j=1...3$) i -edik helyen vett elmozdulásértékeinek segítségével $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvényértékek keresése a legkisebb négyzetes eltérés elve alapján. Az általános deformált lapátalakot a rotorlapát első három saját lengésképének ezek időbeli lefutását biztosító-harmonikus időfüggvényekkel vett lineáris kombinációjával közelítve:

$$Y(x,t) = \sum_{j=1}^3 \Phi_j(x)H_j(t) \quad (2.4.1)$$

A közelítés alapegyenlete:

$$f = \sum_{i=1}^n \left[Y_i - \sum_{j=1}^3 \Phi_j(x)H_j(t) \right]^2 = \min \text{imum.} \quad (2.4.2)$$

A legjobb közelítést adó egyenlet szélsőérték számítás alapján:

$$\frac{\partial f}{\partial H_j} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ Y_i - \sum_{j=1}^3 \Phi_j(x_i)H_j(t) - \Phi_j(x_i) \right\} = 0 \quad (2.4.3)$$

A $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvényértékek 8 teljes rotorfordulatra lettek meghatározva $dt=0.002$ s-os időlépekkel. Így $n=872$ db $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvényértéket kaptam.

2.5.

A konkrét $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvények meghatározása a fentebb kapott időfüggvényértékek alapján a legkisebb négyzetes eltérés elve alapján. Van tehát $n=872$ db. $H_j(n)$ időfüggvényérték és ezeket közelíteni kívánom a:

$$H_j(t) = a_0 + a_1 \sin \omega_j t + b_1 \cos \omega_j t \quad (2.5.1)$$

harmonikus időfüggvénnyel. A módszer alapegyenlete:

$$f = \sum_{i=0}^n \left[H_j(n) - (a_0 + a_1 \sin \omega_j t + b_1 \cos \omega_j t) \right]^2 = \min \text{imum} \quad (2.5.2)$$

E módon megkaptam az összetevőit ($a_0; a_1; b_1; \omega_j$) az összes $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvénynek

2.6.

Az így nyert időfüggvények segítségével az $Y(x,t) = \sum_{j=1}^3 \Phi_j(x)H_j(t)$ elmozdulásfüggvény előállítására. Ez az elmozdulásfüggvény folytonos és differenciálható a lapát hossza mentén és az időben. Ebben a lépésben történt egy grafikus összehasonlítás az $Y(i)$ és az $Y(x,t)$ mérőhelyeken felvett értékei között. Ezt a grafikus összehasonlítást egy PC program végzi $\Delta\psi = 3.3^\circ$ azimutiszög ugrásokkal a rotorlapát hossza mentén. Az $Y(i)$ elmozdulásértékeket a mérőhelyek között egyenesekkel összekötve létrehozott

lapátalak és az $Y(x,t)$ elmozdulásfüggvény által meghatározott lapátalak időben szinkronizáltan lett egymásra rajzolva. A tapasztalat azt mutatta, hogy a kétféle lapátalak kissé inkább fizisbeli mint alakbeli- eltérésekkel jól fedte egymást.

2.7.

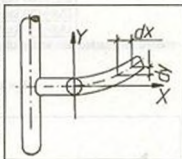
A rotorlapát $IE(x)$ merevségeloszlás-függvényének, és $m(x)$ tömegeloszlás-függvényének meghatározása az egyes metszetekben mért értékekre függvénygörbe illesztésével a MATLAB programcsomag POLIFIT nevű programjának segítségével. A konkrét függvények:

$$\begin{aligned} IE(x) &= e^{(13.8877 - 2.7837x + 0.672x^2 - 0.0004x^3)} \\ m'(x) &= 10.881 - 8.6342x + 2.7684x^2 - 0.263x^3 \end{aligned} \quad (2.7.1)$$

2.8.

Adottak tehát az $Y(x,t) = \sum_{j=1}^3 \Phi_j(x)H_j(t)$, $IE(x)$, $m(x)$,

és $C(x)$ függvények. $C(x)$ a centrifugális erőtér merevítő hatását veszi figyelembe: $C(x) = m(x) \cdot x \cdot r \cdot \omega^2$, ahol r az x ko-ordinátájú pont futási sugara $\beta = 0^\circ$ csapkodási szög esetén. Mivel a csapkodásiszög-tartomány a leggyorsabb repülési esetben is csak 0° és 9° között van, így a csapkodó mozgás esetén létrejövő futási sugár változásoktól eltekinttem. $C(x)$ visszatérítő nyomatéka: $\partial M = C(x) \cdot \partial Y$ lásd a 8. ábrát. A $C(x)$ által a rotorlapáton létrejövő megoszló légerőterhelés:



8. ábra.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[C(x) \cdot \frac{\partial Y}{\partial x} \right] \quad (2.8.1)$$

A fenti függvények segítségével megoldhatóvá válik a következő (1.1) egyenletből megoszló terhelésre centrifugális erőtér merevítő hatása esetén levezethető:

$$\frac{\partial^3}{\partial x^3} \left[IE(x) \frac{\partial^3}{\partial x^3} Y(x,t) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[C(x) \frac{\partial}{\partial x} Y(x,t) \right] = P(x,t) - m(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} Y(x,t)$$

differencial egyenlet. Ennek az egyenletnek a segítségével az ismert tömeg- és merevségeloszlású, ismert elmozdulásfüggvénnyel rendelkező és ismert fordulatszámú rotorlapátot terhelő megoszló légerőrendszert leíró $P(x,t)$ függvény egyértelműen meghatározható.

2.9.

A számítás eredményének ellenőrzése: Vonóerőszámítás az impulzus-tétel és a $P(x,t)$ függvény segítségével. A $P(x,t)$ lapátminti eredőjének $F(t)$ meghatározása garfikus integrálással 0.1 m-es lépésekkel:

$$F(t) = 0.1 \cdot \sum_{i=0}^{60} P(x, t) \quad (2.9.1)$$

és az $F(t)$ 8 teljes rotorfordulatra vett középértéke:

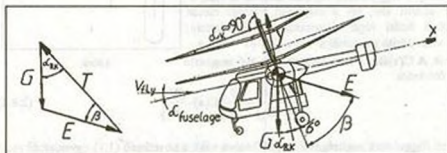
$$F_R = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^{640} F(t) \quad (2.9.2)$$

Az egész helikopterre vett eredő vonóerő: $T=6F_R$ mivel a rotorlapátok száma 6. Ezzel a közelítéssel szimmetrikusnak tételeztem fel a koaxiális hordrendszert ami nem felel meg a valóságnak. Az így kapott eredmények a különböző repülési esetekre:

IAS=0 km/h	T=34531.8 N
IAS=100 km/h	T=30333 N
IAS=120 km/h	T=29343 N
IAS=140 km/h	T=36455.6 N

A vonóerő meghatározása az impulzus tétel segítségével (lásd a 9.ábrát):

$$T = 2\rho A_R \left[V_s^2 + (V_s + v_s)^2 \right]^{1/2} v_s \quad (2.9.3)$$



9.ábra.

A 9.ábra alapján:

$$T = G \cos \alpha_{RK} + E \cos \beta. \quad (2.9.4)$$

Itt $\alpha_{RK} = \alpha_f + \alpha_B$, (ahol α_f a törzs építési vízszintvonalának a pályairányú sebesség irányával bezárt szöge, α_B a rotortengely beépítési szöge, A_R a koaxiális rotor ekvivalens felülete, α_R a sárkány eredő ellenállástényezője, S a törzs középső keresztmetszete) és $V_x = V_f \cos \alpha_{RK}$; $V_y = V_f \sin \alpha_{RK}$. A T-re vonatkozó két egyenletből:

$$2\rho A_R \left[V_1^2 + (V_f + v_s)^2 \right] \frac{1}{2} = \frac{\rho}{2} \left[V_1^2 + (V_f + v_s)^2 \right] \int_R S \cos \left[\arctg \left(\frac{V_f + v_s}{V_1} \right) \right] + G \cos \alpha_{Rk}$$

A 10. ábra mutatja a kétféle módon meghatározott T vonóerő közötti abszolút és relatív eltérést.

Az abszolút eltérések	A relatív eltérések.
4170.58 N	13.73 %
628.2 N	2.02 %
2403.53 N	7.57 %
3684.21 N	11.24 %

10. ábra.

3.A végeredmények értékelése.

Az eredmények közötti eltéréseket gyakorlatilag a $P(x,t)$ és a T számításánál alkalmazott közelítések okozzák. Ezek a következők:

-Az általános deformált lapátalak közelítése során csak az első három sajátlengéskép került alkalmazásra.

-Mindkét vonóerőszámításnál kénytelen voltam szimmetrikusnak tekinteni a koaxiális rotorrendszert, pedig a mérőrotorlapát az alsó rotorsíkhöz tartozott amely a felső rotor megúvási zónájában van.

-A $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvényértékek közelítése a legkisebb négyzetes eltérés elve alapján.

-A konkrét $H_1(t), H_2(t), H_3(t)$ időfüggvények meghatározásánál szintén a legkisebb négyzetes eltérés elvét alkalmaztam.

-Gyakorlatilag közelítésnek tekinthető az $IE(x)$ és az $m(x)$ függvények meghatározása a mért értékekre függvénygörbe illesztésével.

-A $C(x)$ meghatározásánál nem vettem figyelembe a csapkodómozgás okozta futási sugárváltozást.

-Az impulzus tétel alkalmazásánál a rendelkezésre álló adatok hiányában feltételeztem, hogy a lapátvégsík merőleges a rotortengelyre az összes repülési situációban.

4.A felhasznált irodalmak.

1. I.N.Bronstein-K.A.Semendjajev.: Matematikai Kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
2. Dr. Gausz Tamás.: Helikopterek Kézirat. Budapest, 1982.
3. Dr Sályi Béla.:Mechanika II. J7-947 Kézirat Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.
4. Rácz-Varga-Varga.: Repülőgépek szerkezete és szilárdsága. Egyetemi tankönyv, Budapest, 1962.
5. Dr Sályi Béla -Dr Michelberger Pál -Dr Sályi István.: Kinematika és kinetika. Egyetemi Könyvkiadó, Budapest, 1991.

6. Dr Szász Gábor.:Matematika I-II-III.
Egyetemi tankönyv, Budapest, 1989.
7. Varga Pál.: A Ka-26 típusú helikopter gyakorlati aerodinamikája.
Repülőgépes Szolgálat, Budapest ,1978.
8. Dipl.-Ing.H.W.Lindert.: Flugmessungen mit dem hubschrauber Ka-26 im Oktober
1992. Institut für Leichtbau RWTH-Aachen 1992

Resume

The rotorblade is loaded by a very strong variable direction and dimension divisional air load, which causes a deformation in the structure of rotorblade, and this deformation reacts on the air loads so modifies them. This goes to show that the spatial and temporal division of air loads of the rotorblade from aerodinamical side we can calculate only with suppositions and mathematical methods. When we know the structural parameters of the rotorblade, (for example: mass division, inflexibility division, own oscillation pictures, own oscillation frequencies) we can approximate this question with measurements from structural side so we get a much more easier method to determine the spatial and temporal running of the air load of rotorblade with satisfactory accuracy. Mine work is about this method