

**REMONT TURBOMLAZNIH MOTORA
PODRŽAN MODALNOM ANALIZOM LOPATICA**

**TURBOJET ENGINES OVERHAUL SUPPORTED BY MODAL
ANALYSIS OF BLADES**

Dr Strain Posavljak
Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet
Banja Luka

Dr Emil Banjac
ORAO A.D.
Bijeljina

REZIME

Ventilatorske lopatice jednog turbomlaznog motora, predmet su ovog rada. Iste se u procesu remonta motora, na tehnološki propisan način grupišu i po grupama raspoređuju na disk ventilatora. Podaci o njihovim sopstvenim frekvencijama pri prvom modalnom obliku oscilovanja i frekvencijske razlike, osnova su za formiranje grupa. U svrhu dostizanja zadovoljavajućih frekvencijskih razlika, nekim se od lopatica na propisan način oduzima materijala. Modalna analiza lopatica pomoću pogonskog "šejker" sistema, kao tehnološka podrška remontu posmatranog turbomlaznog motora, ito u dijelu koji se odnosi na kolo ventilatora, razmatrana je u ovom radu. Rezultati numeričke modalne analize dobijeni za jednu od lopatica, sa idejom da se lopatici oduzme materijal na način koji nije propisan, takođe su razmatrani.

Ključne riječi: remont turbomlaznih motora, ventilatorske lopatice, modalna analiza

ABSTRACT

The fan blades of one turbojet engine are subject of this paper. The same, in the process of engine overhaul, are grouped and mounted on fan disk on technological prescribed manner. The data about theirs eigenfrequencies, at the first modal shape, and frequency differences, are the base for groups forming. In order to achieving of satisfying frequency differences, material removing to the some blades is carried out on prescribed manner. Modal analysis of blades using of a shop shaker system, as technological support in turbojet engine overhaul, especially in the part relating to the fan rotor, was discussed in this paper. The results of numerical modal analysis, carried out for one of the blades, with the idea that blade material is removed in a manner that not prescribed, were discussed also.

Key words: turbojet engines overhaul, fan blades, modal analysis

1. UVOD

Izlažući se poremećajnim silama, lopatice turboblaznih motora prinudno osciluju. Sa dinamičkim frekvencijama jednakim frekvencijama poremećajnih sila, iste ulaze u rezonancu. Dinamičke frekvencije [1,2], kojima se uzima u obzir obrtanje lopatica, u funkciji su od odgovarajućih sopstvenih frekvencija.

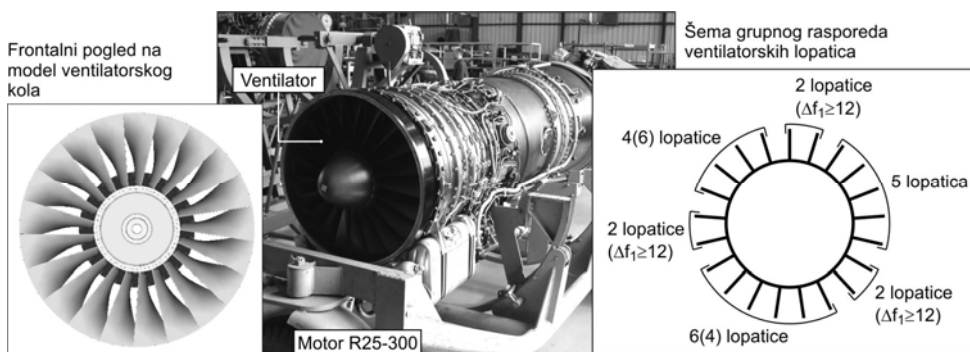
Nekim od lopatica turboblaznih motora je mjerenje sopstvenih frekvencija propisano tehnologijom remonta. Raspored lopatica na disk, prema sopstvenim frekvencijama, može biti prvi razlog. Drugi razlog može biti kontrola lopatica na zamor. U ovom radu je interesantan prvi razlog. Naime, interesantne su nam ventilatorke lopatice turboblaznog motora R25-300, izrađene od čelika 13H11N2V2MF, kod kojih se u pogledu sopstvenih frekvencija pri prvom modalnom (savojnom) obliku oscilovanja, trebaju zadovoljiti tehnološki propisi montaže (rasporeda na disku).

2. VENTILATORSKE LOPATICE TURBOMLAZNOG MOTORA R25-300

2.1. Tehnološki propisi montaže

Jednostepeni ventilator turboblaznog motora R25-300 ima 21 lopaticu u setu. Ove lopatice se na osnovu podataka o izmjerenim sopstvenim frekvencijama f_1 , pri prvom modalnom (savojnom) obliku oscilovanja, i na osnovu frekvencijskih razlika Δf_1 , grupišu i po grupama raspoređuju (montiraju) na disk.

Pomenuti motor, sa istaknutim ventilatorom, frontalnim pogledom na model ventilatorskog kola i šemom grupnog rasporeda ventilatorskih lopatica, prikazan je na slici 1.

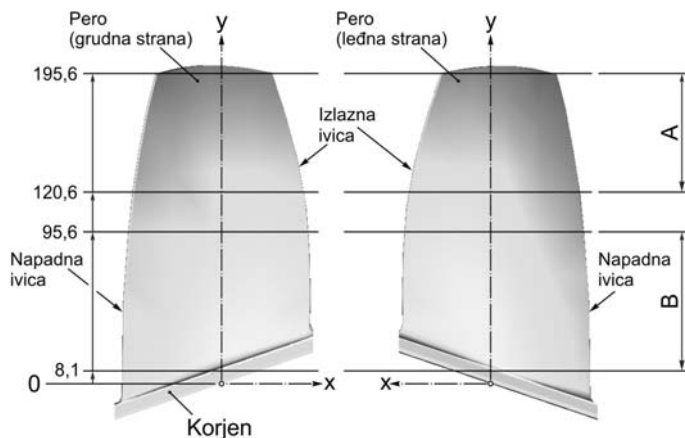


Slika 1. Turboblazni motor R25-300 sa istaknutim ventilatorom, frontalnim pogledom na model ventilatorskog kola i šemom grupnog rasporeda ventilatorskih lopatica

Pri grupisanju ventilatorskih lopatica prema sopstvenim frekvencijama i frekvencijskim razlikama, potrebno je zadovoljiti tehnološke propise montaže sadržane u [3]:

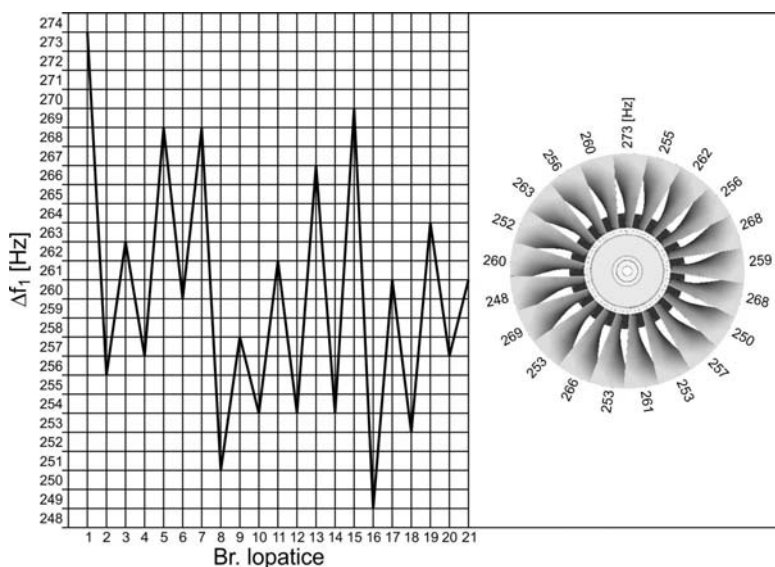
- Ostvariti testerasti raspored lopatica (sopstvena frekvencija proizvoljno posmatrane lopatice treba da je veća ili manja od sopstvenih frekvencija susjednih lopatica).
- Minimalna razlika sopstvenih frekvencija susjednih lopatica treba da je 6 Hz.
- Za dvije ili tri para lopatice u setu, koja nisu jedan do drugog, frekvencijska razlika treba da je 4-5 Hz.
- Frekvencijska razlika na tri para susjednih lopatica treba da je ≥ 12 Hz.
- Frekvencijska razlika za sve lopatice u setu treba da je ≥ 17 Hz.
- Jednaka frekvencijska razlika između 4 susjedne lopatice nije dozvoljena.

Često se pokaže da se sa izmjerenim sopstvenim frekvencijama svih lopatica u setu i sa dostignutim frekvencijskim razlikama, ne mogu zadovoljiti tehnološki propisi montaže. Zbog toga se pristupa podešavanju frekvencija propisanim oduzimanjem materijala, ito brušenjem grudne i leđne strane pera lopatice. Na dijelu A ($y=120,6$ do $y=195,6$ mm) u svrhu povećanja, i na dijelu B ($y=8,1$ do $y=95,6$ mm) u svrhu smanjenja sopstvene frekvencije (slika 2). Sa debljinom od $\approx 0,05$ mm, brušenjem uklonjenog sloja, sopstvene frekvencije lopatica mogu se promjeniti za 1 Hz.



Slika 2. Dva pogleda na solid model lopatice sa oblastima A i B u kojima se sa grudne i leđne strane pera može oduzeti materijal

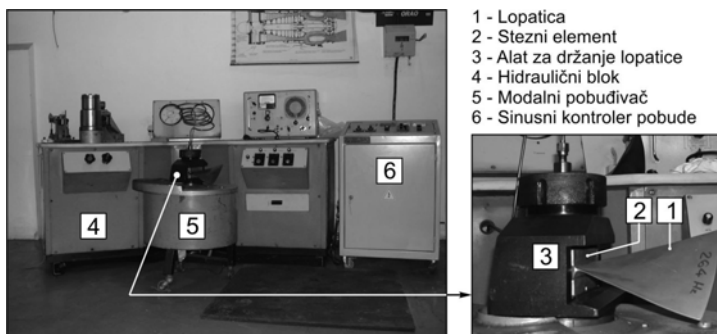
Grupisanje lopatica prema sopstvenim frekvencijama i frekvencijskim razlikama, u preduzeću ORAO A.D., vrši se pomoću posebno razvijenog softvera kod kojeg su tehnološki propisi montaže uzeti u obzir. Numerički podaci sadržani u jednom od izlaznih fajlova ovog softvera, grafički su prikazani na slici 3.



Slika 3. Grafički prikaz numeričkih podataka sadržanih u jednom od izlaznih fajlova softvera za grupisanje ventilatorskih lopatica motora R25-300

2.2. Mjerenje sopstvenih frekvencija lopatica

Za mjerenje sopstvenih frekvencija ventilatorskih lopatica motora R25-300, pri prvom modalnom (savojnom) obliku oscilovanja, u preduzeću ORAO A.D. se koristi pogonski "šejker" sistem prikazan na slici 4.



Slika 4. Pogonski "šejker" sistem koji se koristi u preduzeću ORAO A.D.

Za potrebe ovog rada, za jednu od ventilatorskih lopatica, izmjerena je sopstvena frekvencija pri prvom modalnom (savojnom) obliku oscilovanja. Postupak mjerenja koji se primjenjuje za sve lopatice u setu, sastojao se u sljedećem. Lopatica (poz. 1) je u sklopu sa steznim elementom (poz. 2) ubačena u alat za držanje (poz. 3). Čvrsta veza između lopatice sa steznim elementom i alata za držanje, ostvarena je hidrauličnom siloma stezanja dobijenom pomoću pumpe u hidrauličnom bloku (poz. 4). Elektro-dinamičkom silom modalnog pobuđivača (poz. 5), generisanom pomoću sinusnog kontrolera pobude (poz. 6), alat za držanje lopatice, kao kretni element modalnog pobuđivača, uveden je u vertikalno sinusno pomjeranje. Sa vrijednošću elektro-dinamičke sile od 264 Hz, pojavio se prvi modalni (savojni) oblik oscilovanja predmetne lopatice jer je ista ušla u rezonancu (sopstvena frekvencija, $f_1=264$ Hz, izjednačila joj se sa frekvencijom elektro-dinamičke sile). Kontrolisano povećanje frekvencije elektro-dinamičke sile modalnog pobuđivača, od 0 – 10000 Hz, prati se na digitalnom instrumentu sinusnog kontrolera pobude.

2.3. Mogućnost podešavanja sopstvenih frekvencija i frekvencijskih razlika na način koji nije propisan

Ovdje se pošlo od ideje da se podešavanje sopstvenih frekvencija, a time i frekvencijskih razlika ventilatorskih lopatica motora R25-300, može izvršiti oduzimanje materijala na način koji za sada nije propisan, a riječ je o oduzimanju na napadnoj i izlaznoj ivici. U svrhu verifikacije ideje, primjenom metoda konačnih elemenata (MKE) implementiranog u I-DEAS Master Series softver, provedena je modalna analiza lopatice (MKE modalna analiza) kojoj je na pogonskom "šejker" sistemu, pri prvom modalnom obliku oscilovanja, izmjerena sopstvena frekvencija ($f_1=264$ Hz). Pri tome je korišćena tehnika Guyan-ove redukcije prema kojoj se dinamička jednačina slobodnih neprigušenih oscilacija

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad \dots (1)$$

prevodi u oblik

$$[M^*]\{\ddot{\delta}_m\} + [K^*]\{\delta_m\} = 0 \quad \dots (2)$$

gdje su:

$[M]$, $[M^*]$ – Ukupna i redukovana matrica masa, $[K]$, $[K^*]$ - Ukupna i redukovana matrica krutosti, $\{\delta\}$, $\{\delta_m\}$ - Vektor ukupnih i vektor glavnih (master) pomeranja i $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\ddot{\delta}_m\}$ - Vektor ukupnih i vektor glavnih (master) ubrzanja.

Veze redukovane i ukupne matrice masa i redukovane i ukupne matrice krutosti, definisane su jednačinama

$$\begin{aligned} [M^*] &= \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix}^T [M] \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} \\ [K^*] &= \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix}^T [K] \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

Veza između vektora ukupnih i vektora glavnih (master) pomeranja definisana je narednom jednačinom

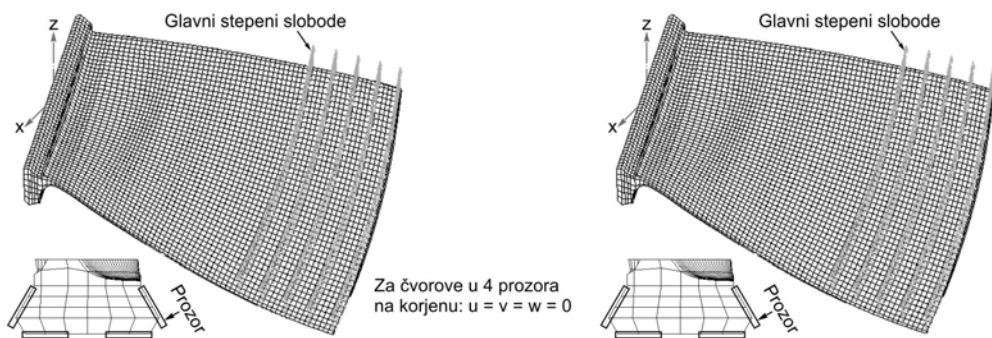
$$\{\delta\} = \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} \{\delta_m\}. \quad \dots (4)$$

U jednačinama (3) i (4) razlikujemo jediničnu matricu I i transformacionu matricu T.

Više o tehnici Guyan-ove redukcije kao i o načinu prevođenja osnovne dinamičke jednačine slobodnih neprigušenih oscilacija (1) u redukovani oblik (2), može se naći u [4,5,6].

Iskustva u vezi sa praktičnom primjenom tehnike Guyan-ove redukcije, stečena u [7,8], korišćena su i u ovom radu.

MKE modalna analiza sastojala se u sljedećem. Iz solid modela lopatice, sa dva pogleda prikazanog na slici 2, generisan je prvi MKE model iz kojeg se poslije neznatne modifikacije došlo do drugog MKE modela (slika 5.).



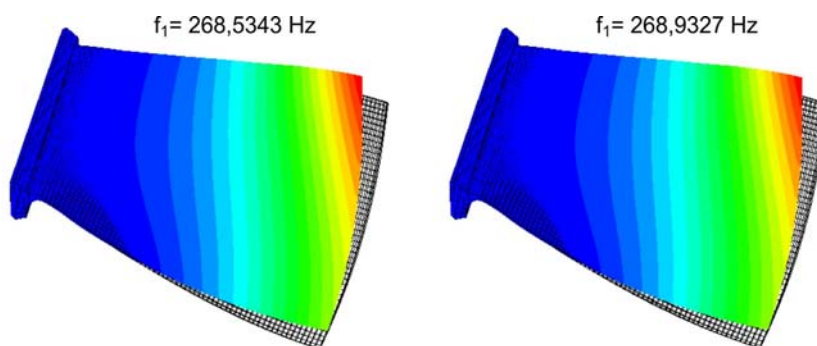
Slika 5. Prvi (lijevo) i drugi MKE model lopatice (desno)

Modifikacijom $30 \times 2 = 60$ konačnih elemenata na napadnoj i isto toliko na izlaznoj ivici (od vrha prema korjenu), iz prvog MKE modela dobijen je drugi MKE model lopatice. Konačnim elementima su u oba slučaja, pridružene karakteristike čelika 13H11N2V2MF (Modul elastičnosti $E = 229184,6$ MPa, Poisson-ov koeficijent $\nu = 0,29$ i Modul klizanja $G = 88831,24$ MPa). Što se tiče graničnih uslova, za čvorove u 4 prozora na korjenu (x , y i z pravac) iznosila su $u=v=w=0$. Broj glavnih (master) stepeni slobode (glavnih pomjeranja u pravcu z ose), kod oba MKE modela bio je isti.

Modifikacijom konačnih elemenata na napadnoj i izlaznoj ivici, smanjenjem njihovih

dimenzija, čime su u izvjesnoj mjeri skraćene tetive aeroprofila, simulirano je oduzimanje materijala na način koji nije propisan.

Prvi modalni (savojni) oblici oscilovanja lopatice, sa pripadajućim sopstvenim frekvencijama, dobijeni primjenom MKE, prikazani su na slici 6.



Slika 6. Prvi modalni (savojni) oblici oscilovanja lopatice sa pripadajućim sopstvenim frekvencijama, za prvi MKE model (lijevo) i drugi MKE model (desno)

Sopstvena frekvencija ventilatorske lopatice dobijena primjenom MKE ($f_1=268,5343$ Hz), za $\approx 1,72\%$ je zadovoljavajuće veća od iste dobijene na "šejker" sistemu ($f_1=264$ Hz). Simulacijom oduzimanja materijala sa napadne i izlazne ivice dobijena je za $\approx 0,4$ Hz veća sopstvena frekvencija ($268,9327-268,5343 \approx 0,4$ Hz).

3. ZAKLJUČCI

Primjenom MKE modalne analize pokazano je da bi se podešavanje sopstvenih frekvencija, pri prvom (savojnom) modalnom obliku oscilovanja ventilatorskih lopatica turbomlaznog motora R25-300, moglo vršiti i oduzimanjem materijala na napadnoj i izlaznoj ivici stim da se mora voditi računa o najmanje dozvoljenim dužinama tetiva.

Ovaj, za sada nepropisan način oduzimanja materijala mogao bi se kombinovati sa načinom koji je propisan, a koji se odnosi na oduzimanje materijala sa grudne i ledne strane pera lopatice.

4. LITERATURA

- [1] Skubačevskij G. S.: Avionski gasoturbinski motori, Konstrukcija i proračun elemenata (prevod sa ruskog), Vazduhoplovnotehnička vojna akademija, Beograd, 1988.
- [2] Kostyuk A., Frolov V.: Steam and Gas Turbine, Mir Publisher Moscow, 1988.
- [3] Motor R25-300, Uput za opštu opravku, ORAO a.d., Bijeljina.
- [4] Lawry M. H.: I-DEAS Master Series, Mechanical CAD/CAM/CAE Software, Student Guide, Structural Dynamics Research Corporation, SDRC Part Number P-60002, 1998.
- [5] Kalajdžić M.: Metod konačnih elemenata, IAMA Beograd, 1978.
- [6] Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method, Third edition, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Maidenhead Berkshire England, 1986.
- [7] Posavljak S.: Practical Problems of Modal Analysis of Aero Engine Blades, Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece, July 1-6, 2007, Editor E. E. Gdoutos, Published by Springer, The Netherlands.
- [8] Posavljak S.: Modalna analiza u službi istraživanja uzroka lomova lopatica turbomlaznih motora, Zbornik radova 9. međunarodne konferencije DEMI 2009, str. 63-68, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, Banjaluka, 2009.