

Veljko Rakonjac,
dipl. inž.
mr Zoran Filipović,
pukovnik, dipl. inž.
Vazduhoplovni opitni centar,
Beograd

MERENJE VIBRACIJA I RELEVANTNIH PARAMETARA LETA TRANSPORTNOG HELIKOPTERA Mi-8 SA REVITALIZOVANIM LOPATICAMA NOSEĆEG ROTORA

UDC: 623.746.174 : 53.08 : 534.13

Rezime:

Rad se odnosi na merenje parametara leta transportnog helikoptera ruske proizvodnje Mi-8 sa ugrađenim originalnim, kao i revitalizovanim – delimično kompozitnim lopaticama nosećeg rotora. Cilj merenja bio je dobijanje relevantnih podataka za ocenu kvaliteta revitalizovanih lopatica usled zamene lopatica nosećeg rotora. Prikazani su oprema, postupak i analiza rezultata merenja parametara leta i vibracija, uz poseban osvrt na probleme izazvane uticajem vibracija na mernu opremu.

Ključne reči: helikopter, vibracije, kompoziti, merna oprema, Parks-McClellanov filter.

VIBRATION AND FLIGHT DATA MEASUREMENT ON THE TRANSPORT HELICOPTER Mi-8 WITH REPLACED MAIN ROTOR BLADES

Summary:

This paper presents helicopter flight data acquisition made on the Russian helicopter Mi-8 with its original main rotor blades as well as with regenerated, partially composite ones. The purpose of the measurement was collecting data for flight quality of the main rotor composite blades changing the actual main rotor blades. This paper also presents equipment, procedures and analysis of flight data and vibration measurements with special attention to problems caused by vibration influence on equipment.

Key words: helicopter, vibration, composites, measurement equipment, Parks-McClellan filter.

Uvod

Cilj ovog ispitivanja jeste da se odredi uticaj zamene originalnih – ruskih lopatica nosećeg rotora transportnog helikoptera Mi-8 (slika 1), domaćim revitalizovanim lopaticama i njihov uticaj na kvalitet leta helikoptera.

Revitalizacija se ogleda u zameni aluminijumskog saća kompozitnom ispunom u segmentima lopatica nosećeg rotora. Po programu letnih ispitivanja proverava se uticaj na performanse helikoptera, kao i eventualni uticaj povećanih vibracija na posadu, odnosno putnike i sa-

mu strukturu helikoptera. Merenja vibracija na helikopteru Mi-8 obavljena su po programu uporednih letnih ispitivanja originalnih i revitalizovanih lopatica nosećeg rotora. Ceo program ispitivanja definisao je VOC, uz učešće VTI, čija stručna ekipa je uradila merenje i analizu vibracija, i VZ „Moma Stanojlović“ koji je ugradio mernu opremu i izvršio dinamičko uravnotežavanje rotora.

Program letnih ispitivanja obavljen sa revitalizovanim lopaticama nosećeg rotora u potpunosti se ponavlja – u svim elementima i sa domaćim lopaticama nosećeg rotora. Kriterijumi kvaliteta leta, per-

formansi i vibracija koje helikopter sa novim ugrađenim lopaticama nosećeg rotora mora da zadovolji definisani su odgovarajućim standardima FAR29 [7], MIL 83300 [5], MIL-H-8501A [8]. Tokom letnih ispitivanja vršeno je merenje više parametara upotrebom PCM/FM telemetrijskog sistema (vreme, statički i dinamički pritisak, temperatura, skupni korak, ubrzanja i ugaone brzine po sve tri ose).

Jedan deo ovih ispitivanja odnosio se i na određivanje stabilnosti i upravljivosti helikoptera. Za to je bilo potrebno snimiti promenu ugaonih brzina oko sve tri ose u funkciji vremena. Tokom analize podataka dobijenih merenjima na samom helikopteru javili su se i određeni problemi.



Sl. 1 – Transportni helikopter Mi-8:
– masa: 11.100 kg; – broj LNR: 5; – broj obrta NR: 192 o/min (3,2 Hz); – DLNR ispuna: HEXEL; – konfiguracija: sa unutrašnjim teretom, sa spoljašnjim teretom

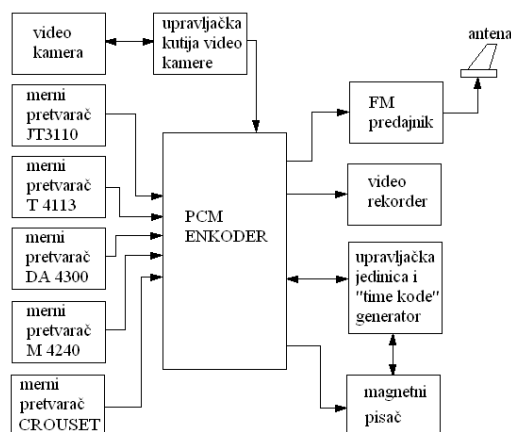
Konfiguracija mernog sistema

Zadatkom za ispitivanje u letu zahtevano je merenje vibracija helikoptera i relevantnih parametara leta. Merenje vibracija urađeno je specijalnom opremom firme Brüel&Kjær pomoću sistema PUL-

SE 3560D. Merenje parametara leta izvršeno je upotrebom digitalnog višekanalnog telemetrijskog PCM/FM sistema.

PCM/FM telemetrijski sistem sastoji se od avionskog i zemaljskog podsistema. Njegov rad je zasnovan na impulsnoj kodnoj modulaciji (PCM data acquisition system). U avionskom podsistemu, prikazanom na slici 2, pomoću određenog broja mernih pretvarača (temperature, troosnih akcelerometara, troosnih žiroskopa i mernog pretvarača za merenje statičkog i dinamičkog pritiska) vrši se konverzija neelektričnih veličina u odgovarajuće električne signale. Oni se zatim digitalizuju (PCM enkoder) i zapisuju na odgovarajućim avionskim registratorima.

Kompozitni digitalni PCM signal, koji nosi informaciju o svim merenim veličinama, zatim se preko jednog ili više predajnika šalje ka zemaljskoj prijemnoj stanici u kojoj se vrši prijem i procesiranje signala koje je inverzno od procesa koji se obavlja u avionskom podsistemu. Na samoj letelici instalirana je i video kamera koja je bila pozicionirana tako da snima instrument-tablu pilota radi direktnog praćenja pokazivanja kabinskih instrumenata.



Sl. 2 – Blok-šema avionskog mernog podsistema



Sl. 3 – Akvizicioni sistem na helikopteru

U pripremi merenja vrši se etaloniranje svakog mernog kanala koji čine: meri pretvarač, meri kondicioner i PCM deo akvizicionog sistema. Električno povezivanje mernih pretvarača i akvizicionog sistema izvršeno je posebnim postupkom širmovanim provodnicima, čime je obezbeđena elektromagnetna kompatibilnost koja predstavlja situaciju u kojoj sve komponente mernog sistema normalno funkcionišu, kako unutar njih samih, tako i u njihovom okruženju (slika 3).

Izbor mernih pretvarača, merno-akvizicionih elektronskih kartica i frekvencije odabiranja merenih veličina izvršen je u skladu sa: očekivanim mernim opsegom, karakterom i dinamikom promene svake merene veličine. Svaki meri pretvarač je kalibrisan u ovlašćenoj

metrološkoj laboratoriji. Primenjeni meri pretvarači imaju analognu formu izlaznog signala sa linearnom zavisnošću u odnosu na neelektričnu mernu veličinu.

U tabeli je prikazana lista parametara koji se mere, sa njihovim amplitudnim opsezima promene, tipovima upotrebljenih mernih pretvarača, kao i zahtevanom tačnošću merenja. Tačnost merenja primenjenog digitalnog PCM merno-akvizicionog sistema proporcionalna je dužini reči kojom se vrši predstavljanje jednog odbirka i iznosi 0,5%. Za ovaj sistem dužina reči je 12 bita [2].

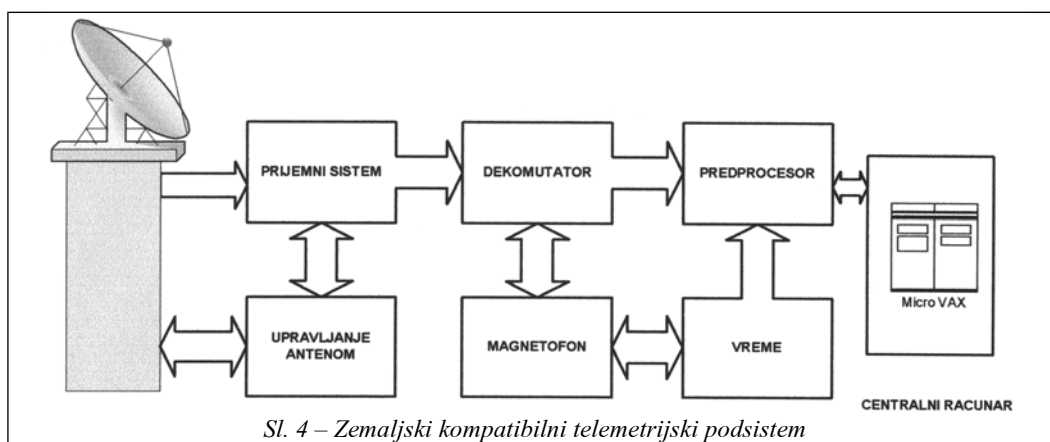
Telemetrijski sistem pored predajnog dela integrisanog na helikopteru obuhvata i zemaljsku prijemnu stanicu gde se vrši dalja obrada primljenih signala. Na slici 4 prikazan je uprošćeni blok-diagram kompatibilnog prijemnog dela telemetrijskog PCM/FM sistema, koji se sastoji od četiri podsistema koji čine:

- prijemni podsistem koji obuhvata prijemnu antenu i prijemnike;
- podsistem za dekomutaciju PCM telemetrijskog signala;
- pretprocesorski podsistem;
- računarski deo sa grafičkim stanicama za prezentaciju rezultata merenja.

Rad telemetrijskog sistema odvija se u dva osnovna režima:

Parametri koji se mere na helikopteru

Red. br.	Merena veličina		Merni pretvarač		
	Oznaka	Naziv	Oznaka	Opseg merenja	Tačnost
1.	p	ugaona brzina oko x ose	Troosni meri pretvarač	$\pm 180 \text{ }^\circ\text{s}^{-1}$	$\pm 0,1\%$
2.	q	ugaona brzina oko y ose	ugaonih brzina DA-4300,	$\pm 90 \text{ }^\circ\text{s}^{-1}$	
3.	r	ugaona brzina oko z ose	sfim	$\pm 60 \text{ }^\circ\text{s}^{-1}$	
4.	a_x	ubrzanje u pravcu x ose	Troosni meri pretvarač	$\pm 1 \text{ g}$	$\pm 0,1\%$
5.	a_y	ubrzanje u pravcu y ose	ubrzanja JT-3110, sfim	$\pm 1 \text{ g}$	
6.	a_z	ubrzanje u pravcu z ose		-3 g do +6 g	
7.	p_s	statički pritisak	Centrala pritiska KW-2210,	0 do 1050 mbar	$\pm 0,1\%$
8.	p_d	dinamički pritisak	sfim	0 do 1050 mbar	
9.	T_z	zaustavna temperatura	T-4113, sfim	-70 do 150 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,2\%$



Sl. 4 – Zemaljski kompatibilni telemetrijski podsistem

- procesiranje mernih signala u realnom vremenu (real time data processing);
- postoperacionalno procesiranje mernih parametara (post-operational data processing).

Pojam procesiranja u realnom vremenu podrazumeva neposredni uvid u određene merne parametre sa dovoljno malim vremenom kašnjenja od trenutka njegovog događanja. To su svi neophodni parametri koji direktno utiču na ispitivanje prototipa letelice u trenutku izvršavanja eksperimenta, kako sa aspekta kvaliteta leta, tako i sa bezbednosnog aspekta same letelice.

Detaljna analiza izmerenih veličina obavlja se posle završetka testiranja i podrazumeva rekonstrukciju leta, najbolju procenu trajektorije letelice, korelacije svih relevantnih događaja tokom eksperimenta, pronalaženje svih neregularnosti tokom testiranja kao i komparaciju dobijenih realnih parametara sa podacima simuliranim u različitim fazama razvoja letelice [2].

Osnovne funkcije koje se obavljaju u procesu prijema i procesiranja telemetrijskog signala sa letelice su:

- prijem mernih podataka sa udaljenih objekata ispitivanja;

- dekomutacija merenih parametara, odnosno rekonstrukcija merene veličine objedinjavanjem odbiraka signala iz MP (PCM dekomutator). Ova faza procesiranja mernih signala podrazumeva više operacija, kao što su kondicioniranje signala i sinhronizacija sa avionskim komutatorom PCM akvizicionog sistema koji generiše vremenski multipleksirani PCM signal;

- kontinualno zapisivanje/arhiviranje primljenih podataka na odgovarajućim magnetofonima koji imaju mogućnost zapisivanja velikom brzinom;

- prikazivanje dekomutovanih i procesiranih mernih podataka u inženjerskim jedinicama u realnom vremenu ispitivanja;

- omogućavanje različitih formi prezentacije (grafici, tabele, itd.) parametara u toku leta na grafičkim stanicama;

- prezentacija izvedenih veličina u toku leta koja se dobija na osnovu nekog algoritma merenih parametara.

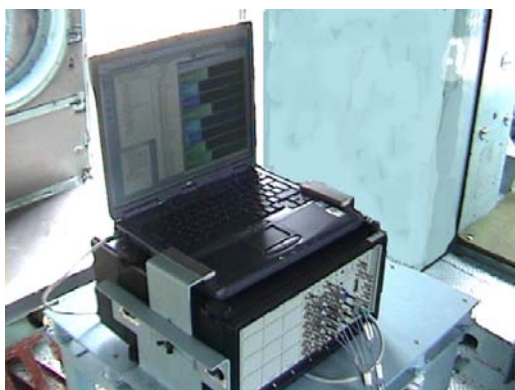
- posleletne detaljne analize mernih podataka uz korišćenje arhiviranih podataka i specijalnih programskih paketa, kao i njihovog eventualnog transfera putem računarskih mreža zainteresovanim korisnicima [3].

Primenjeni PCM/FM telemetrijski sistem omogućuje merenje električnih i fizičkih veličina sa širokim dinamičkim opsegom, malom mernom nesigurnošću i sa povoljnim odnosom signal/šum.

*Sistem za merenje vibracija
PULSE 3560D Brüel&Kjær*

U programu ispitivanja specificiran je broj letova i vrste manevara pri kojima će se meriti vibracije. Postavljen je zahtev da izmerene vibracije budu jedan od kriterijuma za ocenu leta sa domaćim lopticama.

Sve postavljene zahteve zadovoljila je oprema VTI za merenje vibracija i modalnu analizu, kojom su i obavljena merenja. Oprema je zasnovana na sistemu PULSE 3560D, firme Brüel&Kjær [11], a prikazana je na slici 5. PULSE 3560D je višekanalni merni sistem (u našem slučaju radi se o 12-to kanalnom) zasnovan na personalnom računaru. Osnovni PULSE softver (B&K 7700) namenjen je za kontrolu, upravljanje merenjem, akviziciju i obradu signala dobijenih merenjem vibracija i buke.



Sl. 5 – Prenosivi sistem Brüel&Kjær PULSE 3560D

Korišćeni su minijaturni piezoelektrični Delta-Tron® akcelerometri B&K 4507B001 sa ugrađenom elektronikom (IEPE). Ovi pretvarači imaju ugrađene pojačavače, tako da ne zahtevaju niskošumne skupe kablove već obične koaksijalne čija dužina u osnovi nije ograničena, jer je izlaz iz pretvarača naponski signal. Pojačavač pretvarača zahteva jednosmerno napajanje napona od 18 do 32 V sa konstantnom strujom napajanja 2mA, a merni signal se šalje modulisanjem napona na napojnom vodu. Pretvarači spadaju u grupu „pametnih pretvarača“, odnosno sem ugrađenih pojačavača imaju i elektronski ugrađene podatke definisane standardom IEEE 1451-4 (Transducer Electronic Data Sheet-TEDS). U EEPROM se podaci smeštaju preko odgovarajućeg nezavisnog uređaja-programatora. Za postavljanje pretvarača ubrzanja na strukturu korišćeni su posebni nosači, koji su zalepljeni na odabrana merena mesta definisana standardom [10]. Odabrana su četiri mesta, na kojima su vršena merenja u Y (poprečnoj) i Z (vertikalnoj) osi. To su: pilotska kabina „pilot“, transportna kabina „padobranac“, rep helikoptera „konus“, reduktor nosećeg rotora „reduktor“. Ovi akcelerometri mogu da mere ubrzanja do 7000 ms^{-2} u frekventnom opsegu od 0.1 do 6000 Hz. Osetljivost im je 1 mV/ms^{-2} . Pre početka svakog merenja softverski je, jedinstvenom komandom za sve kanale istovremeno, vršeno prilagođavanje ulaznog opsega (od 7,071 mV do 7,071 V) na svakom kanalu na osnovu nivoa merenih vibracija. U slučaju kada se u toku leta prekorače izabrani opsezi, vrlo lako se vršilo podešavanje kanala na kojem je došlo do prekoračenja. Primena ovakvih akcelero-

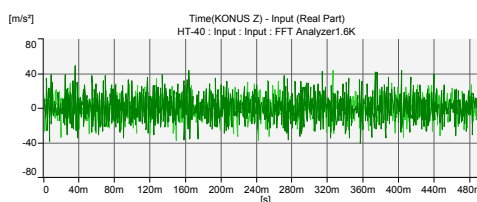
metara znatno je ubrzala pripremu merenja, povezivanje i proveru mernog lanca.

Pošto su se sva merenja, obrada i analize signala obavljala u samom helikopteru u toku leta, izrađen je poseban nosač za kućište KK050 i prenosivi računar. Nosač je pričvršćen za pod kabine helikoptera, a kućište i prenosivi računar se pritežu na gornju ploču nosača, što je prikazano na slici 5. Ova ploča je pomoću 16 amortizera vibroizolovana od strukture helikoptera. Oprema je i pri najvećim nivoima vibracija nesmetano i pouzdano radila.

Obrada rezultata i analiza merenja

Cilj ovih ispitivanja bio je da se uporedi kvalitet leta helikoptera sa originalnim i revitalizovanim lopaticama. Jedan od zahteva je bio da se uporede vibracije helikoptera sa oba tipa lopatica nosećeg rotora. Na slici 6 prikazan je vremenski zapis izmerenog ubrzanja u trajanju 0,5 s. Jasno je da se posmatranjem signala u vremenskom domenu ne bi moglo doći do relevantnih zaključaka u toku samog leta. Zbog toga je odabrano da se već u toku merenja obavlja i FFT signala i da se prate karakteristične učestalosti u posmatranim spektrima.

Za poređenje spektara vibracija odbran je frekventni domen do 100 Hz, a posebno su mereni i spektri do 1600 Hz radi analiza vibrodijagnostike na helikopteru. Oba frekventna domena imaju po 800 linija, a rađeno je 15 usrednjavanja uz primenu Hanningovog prozora. Tako je za niži frekventni opseg od 100 Hz, $df = 0,125$ Hz. Zapisivanje signala u vremenskom domenu traje 8 s, sa učestalošću uzimanja



Sl. 6 – Vremenski zapis izmerenih ubrzanja u pravcu z ose na mernom mestu u konusu

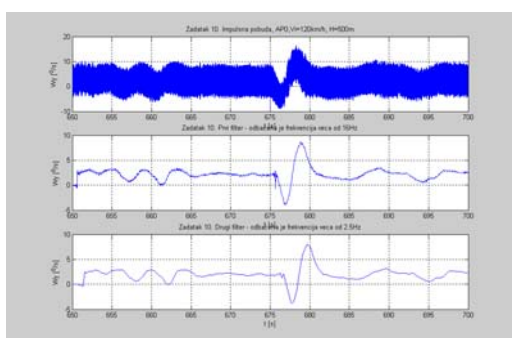
uzoraka od 256 Hz ($dt = 3,906$ ms). U merenjima pri stacionarnim režimima leta preklapanje je iznosilo 75%, pa je trajanje uzimanja uzoraka bilo 36 s, dok se pri manevrima koristilo maksimalno preklapanje, pa je uzimanje 15 zapisa trajalo 12 s. Za prikazivanje izmerenih spektara izabrana je linearna skala i na apscisi i na ordinati, radi brzog uočavanja najdominantnijih vibracija i njihove učestalosti. Na ordinati se prikazuje RMS ubrzanja.

Osim ispitivanja vibracija, programom ispitivanja je definisano da se, pored ostalih performansi, ispita i dinamička stabilnost i upravljivost helikoptera FAR29 [7] MIL 83300 [5]. Za ovu vrstu specijalnih performansi potrebno je meriti sledeće parametre: vremensku bazu, dinamički pritisak, statički pritisak, ubrzanje i ugaone brzine. Parametri leta relevantni za određivanje dinamičke stabilnosti helikoptera su ugaone brzine (W_x , W_y , W_z). Oni su snimani sa 128 odbiraka u sekundi, zbog prirode promene. U jednom od opitnih letova helikopter je leteo na visini od $H=500$ m sa instrumentalnom brzinom $i=120$ km/h. Nakon stabilizacije helikoptera po brzini i visini, pilot je dao impulsnu komandu palicom po dubini (W_y). Ovakvo impulsno komandovanje trebalo bi da izazove oscilujući odgovor helikoptera oko težišta i da da odgovor na pitanje da li je helikopter

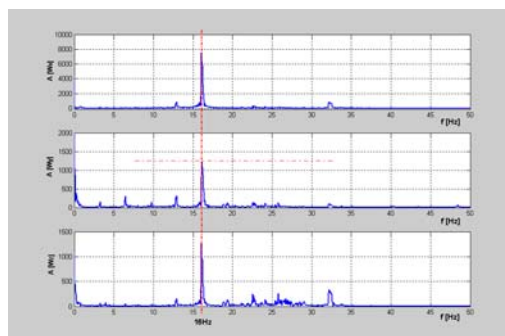
uzdužno dinamički stabilan. Pri obradi snimljenih parametara leta ustanovljeno je da je kod neobrađenih podataka za merenje ugaonih brzina helikoptera dobijen, na prvi pogled, „neupotrebljiv“ zapis, što se može videti na slici 7 (gore). Vibracije helikoptera po amplitudi i frekvenciji „pokrile“ su odgovor helikoptera tako da se ništa nije moglo zaključiti iz njih. Na dijagramu datom u sredini ove slike Parks-McClellanovim filterom prigušene su frekvencije veće od 16 Hz, pa je odgovor helikoptera postao jasan. Na donjem dijagramu urađena je još jedna filtracija i to od 2,5 Hz, pa je kriva postala „ispeglanija“, ali je došlo i do pomeraja krive udesno za jednu sekundu, što se u kasnijoj obradi mora uzeti u obzir.

U radu [1] objašnjeno je kako se određuje dominantna frekvencija koju treba prigušiti.

Poznato je da je učestanost najvećih vibracija na rotoru jednaka proizvodu $N \cdot \text{rev}$, (N)-broj lopatica i (rev)-broj obrtaja ($N = 5$, $\text{rev} = 3,2 \text{ Hz}$). Ove vibracije su posledica dejstva aerodinamičkih sila, dok aerodinamički momenti izazivaju nešto niže nivoe na učestanostima $(N-1) \cdot \text{rev}$ ili $(N+1) \cdot \text{rev}$. Dakle, najveće vi-



Sl. 7 – Ugaona brzina po Y osi tokom izvođenja manevra



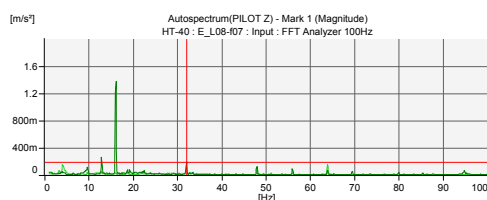
Sl. 8 – Učestanost prolaza lopatica, 16 Hz

bracije od 16 Hz predstavljaju učestanost prolaza lopatica (slika 8). Intenzitet vibracija zavisi od uravnoteženosti rotora, koji mora da se trakira na zemlji (zapis na papiru) i u letu (stroboskopski). Trakiranje je postupak dovodenja krajeva svih pet lopatica u istu ravan, tj. u granicu od 1 inča. Trakiranje na zemlji vrši se tako što se krajevi lopatica obeleže kredom različitih boja, pa pri okretanju rotora lopatice ostavljaju zapis na papiru. Ukoliko je maksimalno rastojanje krajeva lopatica veće od 1" vrši se podešavanje fletnera i postupak se ponavlja. Za prove-re koje se vrše u letu, na krajevima lopatica postavljaju se pločice u raznim bojama koje reflektuju svetlosni zrak stroboskopa. Operater može uočiti koja lopatica „iskače“, pa se nakon sletanja vrše korekcije ugla ugradnje lopatica i postupak u letu se ponavlja, dok se ne dobije „utrakiran“ helikopter. Ista ekipa obavila je uravnotežavanje i trakiranje rotora sa obe vrste lopatica, dovodeći ih na propisane kvalitete uravnotežavanja i trakiranja. Analizom dobijenih podataka ustanovljeno je da je najdominantnija frekvencija oscilovanja strukture 16 Hz, a i nešto manja po amplitudi, ali takođe značajna i frekvencija od 3,2 Hz.

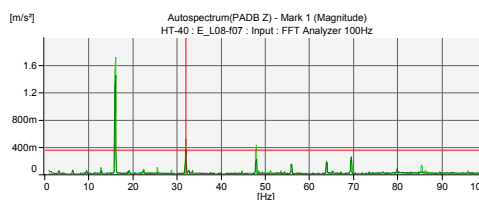
Merenje i analizu vibracija izvršila je stručna ekipa VTI iz čijeg izveštaja [13] su preuzeti rezultati prikazani u ovom članku. Rezultati merenja i analiza ovog ispitivanja dati su na oko pet stotina stranica teksta [13] i [14]. Ovde je prikazan samo deo, na osnovu kojeg se može steći uvid o tome na koji način je vršeno ispitivanje i obrada rezultata.

U toku svakog leta obavljeno je, u proseku, po deset snimanja za potrebe analize vibracija na helikopteru, pri različitim brzinama i manevrima, kao i na različitim visinama. Na helikopteru je ugrađeno osam pretvarača vibracija. Na ekranu notebook računara praćeni su spektri za svako merno mesto u jednom od frekventnih domena, a mogao je da se prati i signal u vremenskom domenu. Za uporednu analizu je odabrano da se prati niži spektar – do 100 Hz. Na slici 9 prikazan je autospektar izmerenih ubrzanja na mernom mestu u kabini (sedište pilota) u pravcu z ose, pri horizontalnom letu brzinom od $v_i = 225$ km/h.

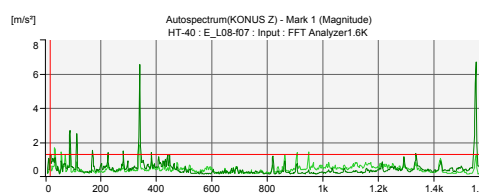
Na mernom mestu u transportnoj kabini helikoptera „padobranac“ (slika 10), takođe su dominantna ubrzanja na učestalosti prolaska lopatica nosećeg rotora, ali se primećuju i vrhovi koji odgovaraju i repnom rotoru i reduktoru.



Sl. 9 – Autospektar u opsegu do 100 Hz izmerenih vibracija u pravcu z ose na mernom mestu „kod pilota“ pri horizontalnom letu brzinom od 225 km/h



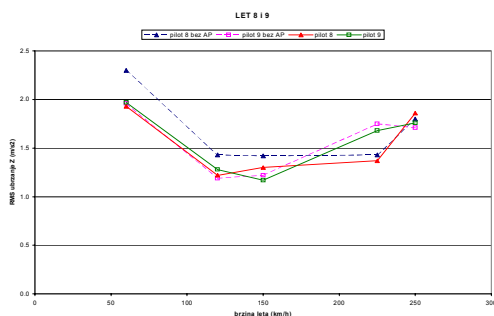
Sl. 10 – Autospektar u opsegu do 100 Hz izmerenih vibracija u pravcu z ose na mernom mestu „kod padobranca“ pri horizontalnom letu brzinom od 225 km/h



Sl. 11 – Autospektar u opsegu do 1600 Hz izmerenih vibracija u pravcu z ose na mernom mestu „repni konus“ pri horizontalnom letu brzinom od 225 km/h

Na mernim mestima na reduktoru i u konusu dominantne su vibracije koje potiču od rada motora, transmisije i reduktora. Tako je na slici 11 prikazan autospektar izmeren na mernom mestu „repni konus“ u pravcu z ose. Vidi se da su nivoi ubrzanja izmereni na višim učestalostima nekoliko puta veći od nivoa izmerenog na učestalosti prolaska lopatica.

Na osnovu merenja za različite brzine u horizontalnom letu, na dve visine, urađeni su dijagrami zavisnosti intenziteta vibracija od brzine leta za merna mesta „pilot“ i „padobranac“. Na slici 12 vidi se da je najveći nivo vibracija u prelaznom režimu od lebdenja u horizontalni let, pri brzini od $v_i = 60$ km/h (u ovoj fazi leta dolazi do prelaska struje vazduha sa donjake aeroprofila lopatice na gornjaku), zatim se vibracije smiruju i od $v_i = 180$ km/h sa povećanjem brzine i one rastu. Treba imati u vidu da su ove vrednosti izmerene na podu pilotske kabine i da treba

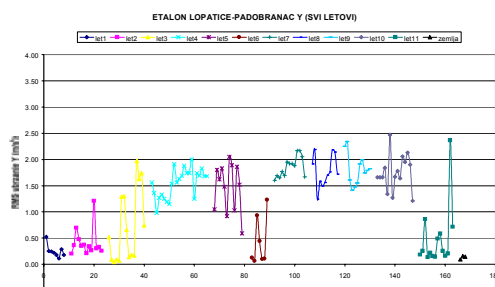


Sl. 12 – Intenzitet vibracija na UPL glavnog rotora u funkciji brzine leta

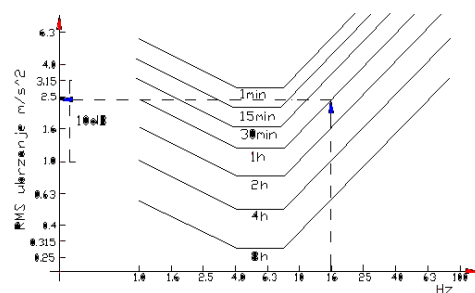
uzeti u obzir amortizaciju pilotskog sedišta pri oceni komfora i granice zamora u skladu sa propisima [9], [12]. Na izvršenim merenjima vibracija helikoptera HT-40 u letu, merno mesto „pilot“ bilo je najbliže sedištu pilota. Na ovom mestu, u pravcu z-ose izmerene su RMS vrednosti na učestanosti prolaska lopatica nosećeg rotora od $0,8 \text{ m/s}^2$ do $1,1 \text{ m/s}^2$ u horizontalnom letu pri brzinama $v_i = 150 \text{ km/h}$ do 180 km/h . Najveće izmerene vrednosti bile su ispod $1,9 \text{ m/s}^2$ u ekstremnim slučajevima pri $v_i = 60 \text{ km/h}$. To znači da u letovima sa revitalizovanim lopaticama nije dostignuta granica smanjenja psihofizičkih osobina (samim tim i granica štetnog uticaja) za period izloženosti od jednog sata. Prenosna funkcija od ovog mernog mesta do površine i naslona sedišta pilota nije određivana, ali kako se sedišta i projektuje da amortizuje vibracije, to je sigurno da su one manje na sedištu. Zbog toga se zaključuje da kod pilota nije došlo do prekoračenja definisane granice komfora. Po završetku letova sa etalon-lopaticama urađena je analiza izmerenih vibracija na učestalosti prolaska lopatica po mernim mestima. Najviše vrednosti RMS ubrzanja na učestalosti prolaska lopatica (UPL) izmerene su na mernom mestu „padobranac“ u pravcu y ose i mernom mestu „pi-

lot“ u pravcu z ose. Na mernom mestu „pilot“ u pravcu z ose najveće vrednosti su se kretale između $1,5 \text{ m/s}^2$ i 2 m/s^2 . Najveća snimljena vrednost na ovom akcelometru za radne tačke po programu merenja bila je $2,3 \text{ m/s}^2$ u horizontalnom letu brzinom $v_i = 60 \text{ km/h}$, bez uključenog autopilota. Na mernom mestu „padobranac“ u pravcu y ose najveće vrednosti su se kretale između 2 m/s^2 i $2,5 \text{ m/s}^2$. Ove vrednosti prikazane su na slici 13.

Standard ISO 2631-1 definiše ograničenja izloženosti ljudskog organizma mehaničkim vibracijama. Što je vreme izlaganja vibracijama duže, to je dozvoljeni nivo ubrzanja niži. Ovaj nivo takođe zavisi i od učestanosti i pravca vibracija i najniži je između 5 Hz i 8 Hz u pravcu

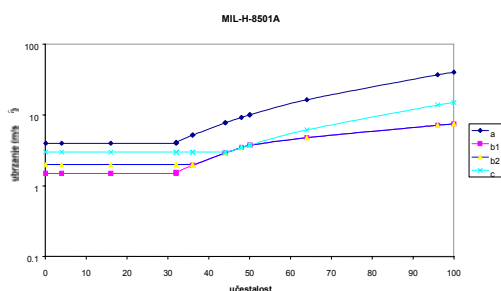


Sl. 13 – Izmerene vrednosti RMS ubrzanja na UPL, na mernom mestu „padobranac“ u pravcu y ose u svim radnim tačkama



Sl. 14 – Vremenska ograničenja izloženosti čoveka vibracijama u pravcu z ose prema standardu ISO2631, definisani su granica komfora i maksimalno dozvoljeni nivo

vertikalne z ose tela. U standardu je definisan način merenja, merna mesta i pravci merenja. Takođe, date su težinske funkcije od učestalosti, sa kojima se množe izmerene vrednosti ubrzanja radi njihovog poređenja sa graničnim nivoima. Na osnovu ovih funkcija nacrtan je dijagram prikazan na slici 14. Za učestalost prolaska lopatica nosećeg rotora od 16 Hz i za jedan sat leta određena je RMS vrednost ubrzanja od $0,8 \text{ m/s}^2$ – granica komfora, $2,45 \text{ m/s}^2$ – granica smanjenja psihofizičkih osobina i 5 m/s^2 – granica štetnog uticaja na čoveka. Ove vrednosti važe za merna mesta na stajnoj površini, odnosno na površini sedišta i naslona.



Sl. 15 – Dozvoljeni nivo vibracija po propisu MIL-H-8501A

U standardu MIL-H-8501A definisane su granice dozvoljenih nivoa ubrzanja za merna mesta na komandama, kod pilota, kod posade i putnika pri različitim režimima leta. Za učestalost prolaska lopatica nosećeg rotora od 16 Hz, ove granice iznose:

$0,4 \text{ g} (\approx 0,28g_{\text{RMS}})$ – a – na komandama leta;

$0,15 \text{ g} (\approx 0,11g_{\text{RMS}})$ – b1 – kod pilota, posade, putnika na brzinama do brzine krstarenja;

$0,2 \text{ g} (\approx 0,14g_{\text{RMS}})$ – b2 – kod pilota, posade, putnika na brzinama iznad brzine krstarenja;

$0,3 \text{ g} (\approx 0,21g_{\text{RMS}})$ – c – kod pilota, posade, putnika pri ubrzavanju i usporavanju.

Na komandama leta nisu merena ubrzanja. U letovima sa revitalizovanim lopaticama granice b1 i b2 bile su prekoračene samo pri $v_i = 60 \text{ km/h}$ i pri letovima sa maksimalnom brzinom od $v_i = 250 \text{ km/h}$. Granica c nije bila prekoračena.

Vibracije koje se javljaju tokom leta helikoptera utiču na mernu opremu i otežavaju proces ocenjivanja kvaliteta leta. Najbolji metod za prevazilaženje ovog problema bio bi proračun i ugradnja antivibracionog postolja, ili kućišta za mernu opremu. Sa antivibracionim postoljem može se prigušiti osnovna frekvencija, u našem slučaju od 16 Hz, a softverskim prefiltriranjem ili postfiltriranjem može se prigušiti frekvencija od 3,2 Hz. Iz literature [6] je poznato da je najbolje izabrati elastomerne izolatore i postaviti ih na takav način da se rotacioni i translacioni vibro inputi dobro priguše. Kao dobar izbor izolatora mogli bi se koristiti neopren izolatori (ME500-1) sa koeficijentom prigušenja 0,05, ali i neki drugi od materijala sa većim stepenom prigušenja, kao, na primer, Barry-LT smeša. Određivanje broja elastomernih izolatora, kao i njihov raspored mogao bi se ispitati u laboratorijskim uslovima, pa tek onda ugraditi na helikopter. Pokušano je sa ugradnjom izolatora prikazanim na slici 3 koji je bio na raspolaganju, ali rezultat nije bio zadovoljavajući. Nažalost, usled nedostatka resursa, kao i ograničenih rokova nije bilo mogućnosti za dugotrajne

eksperimente, pa su dobijeni podaci o ubrzanjima i ugaonim brzinama propušteni kroz poznate softverske filtere. Bilo je na raspolaganju nekoliko metoda, ali najbolji rezultati su dobijeni korišćenjem Parks-McClellanov metoda, tj. equiripple (Equal ripple), i na taj način su prevaziđeni tekući problemi.

Zaključak

Analize podataka dobijenih iz letova sa domaćim lopaticama pokazuju da su performanse helikoptera, kao i vibracije izazvane rotirajućim delovima helikoptera u granicama definisanim odgovarajućim standardima, a u odnosu na ruske lopatice daju čak i nešto bolje rezultate. Da bi se izvršila ovakva analiza obavljena su obimna ispitivanja. Programom letnih ispitivanja definisani su manevri koje su piloti morali da izvedu na graničnim režimima leta. Takođe, oprema korišćena za određivanje performansi, statičke i dinamičke stabilnosti helikoptera spada u red visoko sofisticirane, počev od digitalnog PCM akvizicionog sistema, do telemetrijskog prenosa podataka i on-line prikaza merenih parametara na ekranu računara. Direktna komunikacija opitnog inženjera i pilota omogućava ponavljanje nekih elemenata leta, odmah nakon uočenog nedostatka – ukoliko postoji potreba za tim. Tako je izbegnuto ponavljanje letova, a skraćeno je vreme i resursi potrebni za ovakav zadatak.

Problem uticaja vibracija helikoptera na mernu opremu je poznat. On se,

uglavnom, rešava ugradnjom merne opreme na antivibraciona postolja ili u antivibracione kutije. Pošto svaki helikopter ima specifične vibracije, potrebno je uraditi detaljne proračune antivibracionih postolja, tj. amortizera koji nose ta postolja i koji treba da priguše uticaj dominantnih vibracija helikoptera na mernu opremu. Takođe, moguće je koristiti i softverske filtere koji iz podataka dobijenih merenjem prigušuju one koji su na frekvenciji učestanosti prolaženja njihovih lopatica.

Literatura

- [1] Dević, V., Kovačević, P., Rakonjac, V.: Merenje vibracija na transportnom helikopteru Mi-8, Zbornik radova XLVII Konferencije za ETRAN, Igalo, Sveska II, str. 311–313, jun 2003.
- [2] Marković, M., Filipović, Z., Pavlović, D.: Dizajniranje parametara PCM/FM telemetrijskog sistema, TELFOR, Beograd, 2001.
- [3] Filipović, Z., Marković, M., Pavlović, D.: PCM/FM telemetrijski sistem za merenje vazduhoplova i fizioloških karakteristika pilota, TELFOR, Beograd, 2002.
- [4] Nikodinović, D.: Istraživanje spektra i definisanje kriterijuma dozvoljenih vibracija helikoptera, LOLA Saopštenja, 23 (1988) 36, Beograd 20. septembar 1988.
- [5] MIL-F-83300 Military specification, Flying Qualities of Piloted V/STOL Aircraft, 31. December 1974.
- [6] Avionics system for a small unmanned helicopter Performing aggressive maneuvers. V. Gavrilets, A. Shterenberg, M. A. Dahleh, E. Feron, M. I. T., Cambridge, MA.
- [7] FAR, Part 29-Airworthiness Standards: Transport Category Rotorcraft.
- [8] MIL-H-8501A Military specification, Helicopter flying and ground handling qualities, 5. November 1952.
- [9] Standard ISO2631/1, 1985.
- [10] AGARD-AG-160-VOL-10, Helicopter flight test instrumentation. Keneeth, R.Ferrell.
- [11] Brüel& Kjær, Vibracije helikoptera.
- [12] Giurgiutiu, V., Grant, L., Helicopter Health Monitoring And Failure Prevention Through Vibration Management Enhancement Program, 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, May 1–4, 2000.
- [13] Izveštaj Vojnotehnički institut, Merenje vibracija na helikopteru HT-40 u letu, 2003.
- [14] Izveštaj VOC, Ispitivanje revitalizovanih lopatica na helikopteru HT-40, Vazduhoplovni opitni centar, 2003.

