Mr Slavko Pokorni,
potpukovnik, dipl. inž.

Provjera ispunjenja zahtjeva za pouzdanost elektronskih uređaja savremenih aviona

Članak obrađuje problematiku ispitivanja pouzdanosti proizvoda, primenjenu na jedan elektronski uređaj. Prezentiran je sadržaj programa ispitivanja pouzdanosti, a posebno se obrađuje provjera pouzdanosti konkretnog elektronskog uređaja i daju rezultati ispitivanja pouzdanosti.

Uvod

Pouzdanost uređaja i sistema ili prosto proizvoda jedan je od veoma značajnih pokazatelja njihovog kvaliteta, koji je postao sastavni dio tehničkih podataka ne samo profesionalnih uređaja, a kome se i kod nas sve više poklanja pažnja.

Standardom narodne odbrane SNO 4264/84 propisana je provjera zahtjeva za pouzdanost elektronskih uređaja za vojnu upotrebu.

Za realizaciju takvih ispitivanja potrebni su osposobljeni kadrovi, znatna materijalna sredstva, odgovarajuća oprema i vrijeme. U opitnim centrima (tehnički opitni centar, vazduhoplovni opitni centar) ova ispitivanja treba da se redovno vrše i obavezni su dio programa ispitivanja.

Nužnost i opravdanost provjere postavljenog zahtjeva za pouzdanost posebno dolazi do izražaja kod uređaja od čijeg pouzdanog rada zavisi bezbjednost ljudskih života ili čiji otkaz može izazvati velike materijalne štete, a takav je upravo slučaj kod uređaja za avione.

Zahtjevani nivo pouzdanosti koji se obično izražava numeričkom vrijednošću minimalno prihvatljivog srednjeg vremena do, odnosno između otkaza

za ili zahtjevanim srednjim vremenom do, odnosno između otkaza, mora se ugraditi još u toku projektovanja, a ispunjenje tog zahtjeva neophodno je provjeravati kako u fazi prototipa ili prototipske partije (demonstraciono ili kvalifikaciono ispitivanje pouzdanosti), tako i u fazi serijske proizvodnje (verifikaciona ili prijemna ispitivanja pouzdanosti), što je i propisano ranije pomenutim standardom.

U ovom radu se izlažu osnovne informacije o sadržaju i bitnim koracima u izradi programa provjere zahtjeva za ispunjenje karakteristika pouzdanosti i daje primjer jednog realizovanog programa sa rezultatima ispitivanja za uređaj koji je namenjen za teške i složene uslove eksploatacije borbenih aviona. Uređaj je projektovala i proizvela IRCA Energoinvest Sarajevo, a provjeru ispunjenja zahtjeva za pouzdanost je sproveo Vazduhoplovni zavod »Orao« Rajlovac.

Definisanje programa ispitivanja pouzdanosti

Elaborat ispitivanja pouzdanosti, odnosno provjere zahtjeva za pouzdanost nekog uređaja ili sistema sastoji se u suštini iz dva dijela: programa ispitivanja pouzdanosti, i rezultata ispitivanja.

Izrađuje ga izvršilac ispitivanja, a verifikuje nadležni organ tj. opitni centar ili druga institucija.

Prvi dio, odnosno program ispitivanja obuhvata:

1. — *Cilj ispitivanja.* Obično se definiše kao: provjera da li je zadovoljen zahtjev za srednje vreme između otkaza prema zahtjevima propisa o kvalitetu proizvoda — PKP-a.

2. — *Podatke neophodne za ispitivanje,* kao što su:

a — *podaci o ispitivanom uređaju ili sistemu:* naziv, proizvođač, faza proizvodnje, ispitni uzrok, veličina ispitnog uzorka, način izdvajanja ispitnog uzorka, minimalno prihvatljivo (ili zahtjevano) srednje vrijeme do/između otkaza, rizik proizvođača i korisnika (naručioca), faktor diskriminacije.

Ispitni uzorak se načelno izdvaja metodom slučajnog izbora između uređaja koji su zadovoljili sva ispitivanja propisana PKP-om i prošli proces uhodavanja, a sastoji se načelno od najmanje 3 uređaja (sistema), a ako je serija manja od 3 komada, onda se ispitivanje vrši na svim uređajima.

b — *podaci o statističkom planu ispitivanja:* broj i karakter plana, i na osnovu izabranog plana razrađeni kriteriji i vrijeme trajanja ispitivanja.

Za izbor statističkog plana redosljednih (sekvencijalnih) ispitivanja mogu se koristiti američki vojni standard MIL—STD—781C, odgovarajuće preporuke IEC, sovjetski GOST, ili drugi odgovarajući standardi.

c — *podaci o uslovima ispitivanja:* razrada odnosno uhodavanje ili stareње uređaja, podešavanje i kalibracija u skladu sa PKP-om, uslovi napajanja, uslovi rada i okoline uključujući termička, električna, mehanička i druga opterećenja, vremenski program — ciklusi ispitivanja, parametri koji se provjeravaju sa dozvoljenim odstupanjima, vremenski program i način mjerenja (kontrole) parametara koji se provje-

ravaju i uslovi rada i okoline pri ispitivanju, preventivno i korektivno održavanje u toku ispitivanja, trajanje ispitivanja po uređaju i ukupno.

Razrada uređaja se vrši radi prolaska kroz period takozvanih ranih otkaza (period »dječjih bolesti«) koji se javljaju usljed grešaka u proizvodnji komponenti i montaži uređaja, jer navedeni standardi podrazumevaju eksponencijalnu raspodjelu vremena do otkaza. Ukoliko u procesu uhodavanja dođe do otkaza, uređaj treba nakon poslednje opravke da izdrži najmanje dva ciklusa ispitivanja bez otkaza.

Uslovi ispitivanja pri razradi treba da su takvi da se za minimalno vrijeme pojavi maksimalni broj otkaza, ali bez izazivanja otkaza koji se ne bi mogli javiti u normalnoj eksploataciji, već uz preciznu simulaciju uslova radne sredine.

Ciklusi i uslovi ispitivanja pri proveri pouzdanosti treba da su takvi da precizno simuliraju uslove u kojima će se uređaj koristiti, odnosno da budu što vjerniji stvarnim uslovima u eksploataciji.

Proces definisanja postupka i uslova razrade i ispitivanja pouzdanosti uređaja predstavlja kritičan korak u izradi programa ispitivanja pouzdanosti i zahtjeva saradnju naručioca i nosioca izrade programa, kao i dobro poznavanje uslova u kojima će uređaj obavljati svoju funkciju, odnosno poznavanje profila misije (zadatka) uređaja.

d — *definisanje otkaza:* način evidentiranja otkaza, što se smatra relevantnim a šta nerelevantnim otkazima, koji se otkazi računaju a koji ne, vrijeme koje se uzima u proračun, način odlučivanja o klasifikaciji otkaza. Ovo je takođe jedan od važnih koraka u izradi programa, koji zahtjeva poznavanje principa rada i funkcije uređaja i saradnju nosioca izrade programa i projektovanja uređaja.

e — *ostali zahtjevi i upute:* postupak izveštavanja o otkazima i postupak

sa uređajima po nastanku otkaza te koje se akcije preduzimaju, postupak nakon donošenja odluke, itd.

f — *spisak mjernih instrumenata i opreme.*

g — *razni obrazci:* za evidentiranje i klasifikaciju otkaza, i tome slično.

Drugi dio programa obuhvata rezultate i analizu rezultata ispitivanja sa zaključkom i predlozima, dokumentaciju o ispitivanju (dnevnik ispitivanja, izvještaje o otkazima, etikete o otkazima), klasifikaciju svih registrovanih otkaza, preduzete akcije po nastanku otkaza, rezultate ispitivanja sa proračunom srednjeg vremena do/između otkaza za uređaje i ukupno, pregled otkaza zavisno od serijskog broja uređaja i vremena ispitivanja, grafik prihvati/odbaciti sa ucrtanim podacima iz ispitivanja.

Otkazi iz perioda uhodavanja se ne računaju u rezultate prihvatiti/odbaciti, ali se analiziraju i uzimaju u obzir pri donošenju konačnog zaključka i predloga.

Provjera pouzdanosti uređaja UPSU

Osnovni zahtjevi za pouzdanost i program ispitivanja

Uređaj UPSU je namenjen za ugradnju na borbene supersonične avione superiornih letnih karakteristika.

Uređaj treba da ima pouzdanost izraženu minimalno prihvatljivim srednjim vremenom između otkaza od 1000 sati. Proizvođač i naručilac su prihvatili rizik od 20%, i faktor diskriminacije 1,5. Iz prednjih zahtjeva proizilazi da je zahtjevano srednje vrijeme između otkaza $1000 \times 1,5 = 1500$ sati.

Na osnovu gornjih zahtjeva je, prema MIL—STD—781C, usvojen za ispitivanje statistički test plan PC redosljednog (sekvencijalnog) ispitivanja.

Osnovni razlozi za usvajanje test plana PC sekvencijalnog ispitivanja su

uglavnom sljedeći. Zahtjev za srednje vrijeme između otkaza je unapred postavljen i izražen kroz minimalno prihvatljivo srednje vrijeme između otkaza. S obzirom da se radi o elektronskom uređaju, pretpostavlja se da će distribucija otkaza u toku perioda normalne eksploatacije odgovarati eksponencijalnoj raspodjeli. Takođe se pretpostavljalo da će stvarno vrijeme između otkaza uređaja biti blisko zahtjevanom u PKP-u.

Za ispitivanje, iz nulte serije, od 9 uređaja koji su prošli proces uhodavanja, metodom slučajnog izbora odabrana su za ispitni uzorak 3 uređaja.

Na osnovu izabranog test plana PC i uzorka od 3 uređaja, došlo se do sljedećih kriterija za vrijeme ispitivanja u pogledu prihvatanja postavljene hipoteze o minimalno prihvatljivom srednjem vremenu između otkaza od 1000 sati:

— minimalno ukupno vrijeme ispitivanja od 4190 sati ili 1397 sati po uređaju, pod uslovom da se ne desi ni jedan otkaz,

— u slučaju nastanka jednog otkaza vrijeme ispitivanja bi se nastavilo do ukupno 5000 sati ili 1800 sati po uređaju, pod uslovom da se više ne desi ni jedan otkaz.

Uslovi razrade uređaja UPSU

Razrada uređaja se vrši u cilju prolaska kroz period ranih otkaza da bi uređaj ušao u fazu ispitivanja bez ranih otkaza koji nastaju zbog grešaka u materijalu, proizvodnji i montaži i slično.

Uslovi opterećenja u toku razrade uređaja treba da su takvi da se za minimalno vrijeme pojavi maksimalni broj otkaza, ali bez uzrokovanja otkaza koji se ne mogu javiti u normalnoj eksploataciji, već uz preciznu simulaciju uticaja radne sredine.

Vrijeme razrade se ne uračunava u ukupno vrijeme ispitivanja, jer pri-

mjenjeni test plan (eksponencijalna raspodjela vremena do otkaza) važi za takozvani period normalne eksploatacije, koji podrazumjeva da je uređaj izašao iz perioda ranih otkaza.

Razrada uređaja izvršena je sa 80x po uređaju, kombinovanim podvrgavanjem uređaja vibracijama pri uključenom napajanju (ciklus »A«) i temperaturnom cikliranju sa uključivanjem i isključivanjem napajanja (ciklus »B« je prikazan na slici 1.

Sl. 1 — Ciklus opterećenja kojim se izlažu uređaji u toku razrade

Temperaturni ciklusi, u pogledu gradijenata i nivoa bili su nešto blaži nego što se predviđa u eksploataciji. Ova konstatacija se odnosi i na vibracije.

Postupak razrade uređaja sastojao se od ciklusa vibracija od dva sata na početku i na kraju i 38 temperaturnih ciklusa između, što je ukupno 80 sati. Postavljen je uslov da se u posljednjih

10 ne javi kvar, inače se vrijeme uhođavanja produžava za još 10 ciklusa (20 sati).

Uslovi ispitivanja pouzdanosti uređaja UPSU

Uslovi ispitivanja pouzdanosti određeni su tako da korektno simuliraju uslove prema profilu zadatka aviona na kojima će se uređaj koristiti, pri čemu svaki ciklus reprezentuje dva karakteristična profila leta; letnji i zimski. Ispitivanje je predstavljalo kombinaciju dva osnovna ciklusa, od kojih jedan (ciklus »A«) slika 2, predstavlja kombino-

Sl. 2 — Ciklus kombinovanih termičkih i električnih opterećenja kojim se izlažu uređaji u toku ispitivanja pouzdanosti (ciklus A na ilustraciji 4)

van uticaj termičkih i električnih opterećenja, a drugi (ciklus »B«), slika 3, kombinovan uticaj termičkih opterećenja, električnih opterećenja i vibracija. Ciklus »B« se razlikuje, u suštini, od ciklusa »A« po primjeni slučajnih vibracija u trajanju od dva sata, pri snažnim temperaturama. Vodilo se računa

da nivo i distribucija opterećenja budu ravnomjerni u jednom ispitnom ciklusu, slika 4. Spektralna gustina snage slučajnih vibracija zadovoljava zahtjeve MIL—STD—781C.

Sl. 3 — Ciklus kombinovanih termičkih i električnih opterećenja i vibracija kojima se izlažu uređaji u toku ispitivanja pouzdanosti (ciklus B na ilustraciji 4)

gućnosti postojeće klima komore. Ovo je predstavljalo originalno tehničko rešenje stručnjaka VZ »ORAO« kojim su postignuti gradijenti do 15°C/min u fazi hlađenja i 5°C/min u fazi grejanja. Rashladni sistem je realizovan sa tečnim azotom uz korištenje procesorskog upravljanja.

Rezultati ispitivanja pouzdanosti uređaja UPSU

a — u toku razrade uređaja

U toku razrade devet uređaja, sedam je prošlo proceduru bez otkaza, a na 2 su se desili otkazi nakon 20 ciklusa. Nakon otklanjanja kvarova nastavljeno je ispitivanje uz ponavljanje postupka, prema zahtjevima programa ispitivanja u toku razrade, i uređaji su uspješno prošli ponovljenu proceduru.

b — u toku ispitivanja pouzdanosti

Ispitivanju su podvrgnuta tri uređaja od kojih je jedan namjerno odbačen od onih na kojima su se desili otkazi u toku razrade. Dobijeni su sljedeći rezultati:

Sl. 4 — Program opterećenja i provjere rada u toku ispitivanja (ponavlja se u toku ispitivanja potreban broj puta)

Oprema za ispitivanje

Nepostojanje odgovarajućih termokomora sa temperaturnim gradijentom od najmanje 7,5°C/min, koliko su zahtjevali uslovi ispitivanja, nametnulo je potrebu dogradnje i proširenja mo-

— jedan uređaj je odradio 1475 sati bez ijednog otkaza,

— drugi ukupno 1305 sati sa 2 otkaza (poslije 210 i 1305 sati), a

— treći 1445 sati takođe sa dva otkaza (poslije 180 i 1080 sati).

Sl. 5 — Grafik — prihvatiti/odbaciti statističkog test plana IIC sa ucrtanim podacima dobijenim na osnovu ispitivanja

Dakle uređaji su odradili ukupno 4225 sati (bez vremena razrade), kada je ispitivanje prekinuto, po dogovoru, zbog velikih troškova. Na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem, ustanovljeno srednje vrijeme između otkaza uređaja UPSU, u specificiranim uslovima eksploatacije, iznosi 1056 sati.

Rezultati ispitivanja su ucrtani u grafik prihvatiti/odbaciti test plana IIC, na slici 5, u skladu sa zahtjevima vojnog standarda MIL—STD—781C.

Rezultati pokazuju da je tok ispitivanja tekao tako da nije mogla biti donesena odluka o prihvatanju ili odbacivanju hipoteze, nego da bi ispitivanje trebalo i dalje nastaviti.

Iako se ovdje ne radi o ispitivanju na osnovu test plana određene dužine, a ispitivanje je prekinuto bez odluke, ipak je da bi se dobili podaci o granicama ocenjenog srednjeg vremena između otkaza, uz određeni rizik naručioca, upotrebljen kriterij za takvu ocenu srednjeg vremena između otkaza prema MIL—STD—781C. Na osnovu toga je za usvojen rizik naručioca od 20%, odnosno interval poverenja od 80%, dobijeno: donja granica srednjeg vremena između otkaza iznosi 766 sati, a gornja granica 1840 sati.

S obzirom na trenutak u kome je prekinuto ispitivanje, nije se mogla donijeti odluka ni da je hipoteza potvrđena ni opovrgnuta, tj. ni odluka prihvatiti, ni odbaciti, već je ispitivanje trebalo nastaviti. Međutim to bi iskazivalo troškove. Zbog toga je ovdje potrebno detaljnije komentarisati rezultate, program ispitivanja i sam pristup odabiranju test plana ispitivanja.

Da bi došlo do odluke o prihvatanju, uređaji bi trebalo da izdrže bez otkaza bar još ukupno 5000 sati, a da bi brzo došlo do odluke o odbacivanju trebalo bi da se za stotinjak sati desi bar još četiri otkaza, što je na osnovu dosadašnjih rezultata malo vjerovatno.

Analizirajući rezultate, može se uočiti da su prva dva otkaza nastala relativno rano (poslije 180 na jednom i 210 sati na drugom uređaju). Obzirom da su uslovi pri razradi bili blaži od uslova koji se očekuju u eksploataciji, odnosno pri ispitivanju, vjerovatno nisu bili takvi da se eliminišu otkazi iz perioda ranih otkaza, već su se pojavili u toku ispitivanja, i time nepovoljno uticali na rezultate ispitivanja. S obzirom da primjenjen plan ispitivanja, kako je to već rečeno, važi za period normalne eksploatacije, odnosno eksponencijalnu

raspodjelu vremena do otkaza, to ukazuje na potrebu pažljivog razmatranja uslova pri razradi uređaja, kako sa stanovišta nivoa opterećenja tako i u pogledu trajanja ispitivanja. Ovdje bi period razrade trebalo da traje bar 200 sati, što je prvobitno i predlagano. Međutim to podrazumjeva da takvu razradu prođu uređaji prije nego krenu u eksploataciju.

Ovdje treba imati u vidu još jednu činjenicu koja se pokazala veoma značajnom. Naime, u toku projektovanja uređaja nije izvršena računska provjera zahtjeva za pouzdanost. Autor ovog članka je izvršio proračun srednjeg vremena između otkaza na osnovu orjentacionog proračuna pouzdanosti prema metodologiji izloženoj u [6]. Primjenjen je orjentacioni proračun jer je jednostavan i brz za razliku od detaljnog. U postupku orjentacionog proračuna dobijeno je srednje vrijeme između otkaza od 1490 sati, naravno za komponente koje su ugrađene u uređaj, vrstu aviona i mesto ugradnje uređaja na avion.

Dobijeno srednje vrijeme između otkaza je blisko zahtjevanom (1500 sati), međutim treba imati u vidu da iskustvo pokazuje (uključujući i dosadašnje autorovo) da se u postupku detaljnog proračuna, koji je mjerodavniji, dobijaju manje vrijednosti srednjeg vremena između otkaza, te da bi u postupku orjentacionog proračuna trebalo postići bar dva puta veće srednje vrijeme između otkaza od zahtjevanog, kako bi postojala garancija da će uređaj stvarno imati srednje vrijeme između otkaza blisko zahtjevanom. Tada je mnogo vjerovatnije da će relativno brzo doći do završetka ispitivanja sa odlukom o prihvatanju, čime se štedi vrijeme i novac.

Ovo ukazuje i na problem pažljivog odabiranja test plana. Da je naprimjer, za ovo ispitivanje odabran test plan određene dužine XVIIC (sa odnosom diskriminacije 3,0 i rizicima odlučivanja proizvođača od 17,5% i naručioca 19,7%), za iste ove rezultate ispi-

tivanja, došlo bi do odluke o odbacivanju postavljene hipoteze (za vrijeme od 4300 sati ispitivanja došlo je do više od tri otkaza).

Zaključak

Rad na izradi programa ispitivanja (provjere) pouzdanosti i analize rezultata su pokazali da je od posebnog značaja pravilno definisanje uslova i trajanja razrade uređaja i uslova ispitivanja pouzdanosti. Pri tome uslovi (nivoi opterećenja) i vrijeme trajanja razrade treba da su takvi da za kratko vrijeme dovedu do prolaska uređaja kroz period ranih otkaza, a da ne izazivaju otkaze koji se u normalnoj eksploataciji (obzirom na opterećenje) ne bi mogli desiti.

Takođe uslovi ispitivanja pouzdanosti treba da su precizna simulacija uslova eksploatacije, koji su za borbene avione veoma složeni i teški, pa su od presudnog značaja korektnost uslova i mogućnosti opreme za ispitivanje. Svakodostupanje od stvarnih uslova eksploatacije, pri ispitivanju (obično je to ublažavanje uslova), dovodi do nekorektnih rezultata (dobija se veća pouzdanost nego što će to biti slučaj u eksploataciji). U vezi sa tim treba istaći da je postojeća oprema zahtjevala značajnu dogradnju jer nije zadovoljavala stroge zahtjeve ispitivanja u uslovima eksploatacije uređaja na avionima. Međutim nova oprema takve zahtjeve zadovoljava.

Jedan od problema takođe predstavlja izbor test plana, koji će za razumno vrijeme i rizike naručioca i proizvođača (imajući u vidu troškove ispitivanja koji su veliki) dovesti do korektnih odluka. U vezi sa tim je i zahtjev za pouzdanošću koji se u postupku projektovanja mora ugraditi i računski provjeriti proračunom prognostičke pouzdanosti čime će se postići veća vjerovatnoća pa će se provjera pouzdanosti obaviti za kraće vrijeme i završiti odlukom o prihvatanju uređaja. U ovom slučaju nije izvršena računska provje-

ra ispunjenja zahtjeva za pouzdanost kod proizvođača, odnosno prije podvr-gavanja uređaja ispitivanju, pa je pretpostavka o bliskosti stvarnog i zahtjevanog srednjeg vremena između otkaza zasnovana na neprovjerenoj pretpostavci, a time i analiza za izbor odgovarajućeg test plana, na što ukazuju i rezultati ispitivanja.

Analiza rezultata ispitivanja tako-đe ukazuje na slabe tačke u izboru komponenti, koncepciji, montaži i proizvodnji uređaja, i predstavlja osnovu za preduzimanje mjera na poboljšanju pouzdanosti i kvaliteta u cjelini.

Možda treba — istaći da razrada programa ispitivanja predstavlja originalnu i kreativnu primjenu poznatih

kriterija, testova i zahtjeva u skladu sa konkretnim uslovima primjene uređaja, i da je i kod nas moguće i potrebno sprovesti ispitivanja pouzdanosti, pogotovo za profesionalne uređaje gdje su zahtjevi u pogledu kvaliteta veoma strogi. Ovome treba dodati da *ispitivanje pouzdanosti uređaja za vazduhoplove, pogotovo visokih performansi, spadaju među najsloženije i najteže.*

Realizacija ovog programa je, međutim, pokazala da je naša vazduhoplovna industrija, tačnije Vazduhoplovni zavod »Orao«, u stanju da vrši eksperimentalne provjere i ispitivanja prema strogim zahtjevima stranih (i domaćih) vojnih standarda, koji predstavljaju i vrhunac svjetskih standarda.

Literatura:

- [1] Standard narodne odbrane SNO 4264/84, PO-UZDANOST — Provjera zahtjeva za srednje vrijeme između otkaza u slučaju eksponencijalne raspodjele, Sl. voj. list br. 8/84.
- [2] Military Standard MIL-STD-781C, Reliability Design Qualification And Production Acceptance Tests: Exponential Distribution, USA Department of Defense, 1977.
- [3] Elaborat o provjeri pouzdanosti uređaja UPSU, VZ »ORAO« Rajlovac, 1990.
- [4] PKP 2826/88 (Uređaj za poboljšanje stabilnosti i upravljivosti aviona), Energoinvest Sarajevo.
- [5] MIL-HDBK-217D, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1982.
- [6] Pokorni S.: »Metodologija ugradnje zahtevane pouzdanosti elektronskih uređaja na vazduhoplovima«, XXXI konferencija ETAN-a, II sveska str. 155—163, Bled, 1987.
- [7] Pokorni S., Pavlović S.: Ispitivanje pouzdanosti elektronskih uređaja za vazduhoplove, ETAN, Zagreb, 1990.
- [8] Pokorni S.: Provjera ispunjenja zahtjeva za pouzdanost elektronskih uređaja za vazduhoplove, Kvalitet i standardizacija, 1/1991.