

Pouzdanost sistema – vremenski ograničen test

Dr Vladimir Zeljković, dipl.inž.¹⁾

Tretirana je pouzdanost sistema. Razmatran je test parametra eksponencijalne raspodele - srednje vreme između otkaza (MTBF), pri vremenski ograničenom testu. Date su teorijske postavke vezane za vremenski ograničen test i test ograničen otkazima. Izvedene su osnovne statističke relacije za određivanje tačkaste procene MTBF i intenziteta otkaza, kao i statističke relacije za određivanje donje i gornje granice parametra definisanog nivoa poverenja. Razmatran je uticaj veličine skupa testiranja na granice parametara. Prikazana je kriva operativne karakteristike. Izložen je konkretan primer testiranja računara električne komande leta aviona.

Ključne reči: Pouzdanost, test, vremenski ograničen test, srednje vreme između otkaza (MTBF), operativna karakteristika.

U v o d

POUZDANOST je verovatnoća da će sistem/komponenta (proizvod) uspešno obaviti namenjenu funkciju za predviđeni period vremena u specificiranim uslovima. Pouzdanost izražava uspeh i realizaciju zadate funkcije. Suprotno pouzdanosti, nepouzdanost pokazuje nerealizovanu funkciju, neuspeh ili otkaz. Pouzdanost proizvoda postaje značajna u svakodnevnoj upotrebi proizvoda, posebno u slučajevima kada otkaz proizvoda može da dovede do značajnih zastoja u proizvodnji, velikih materijalnih šteta, ekoloških katastrofa, ili ugrožavanja ljudskih života. Treba naglasiti veoma visoke troškove održavanja kod realizacije sistema s niskom pouzdanošću i kratkim vremenom između otkaza. Česti otkazi sistema zahtevaju veliki broj rezervnih delova, angažovanje velikog broja stručnjaka za održavanje, gubitak vremena zbog neoperativnosti i niske raspoloživosti sistema, tako da troškovi održavanja mogu nadmašiti (čak i više puta) troškove nabavke. Zbog toga se ne može optimizovati sistem održavanja i smanjiti ukupne troškove u životnom veku sistema, ako proizvod inherentno nema zadovoljavajući nivo pouzdanosti.

Svi proizvođači moraju da proizvode pouzdane proizvode i da razvijaju adekvatan servis koji će od korisnika zahtevati minimalne troškove u toku celog životnog veka proizvoda, da bi ostali konkurentni na današnjem globalnom tržištu. Zahtev za pouzdanošću proizvoda, komponenti i sistema, nikada nije bio veći, posebno među organizacijama koje teže većoj konkurentnosti na svetskom tržištu.

Sa stanovišta praktične primene, problematika pouzdanosti proizvoda i sistema ima dva dela. Prvi deo čini projektovanje pouzdanosti, a drugi deo čini testiranje pouzdanosti. U okviru projektovanja pouzdanosti vrši se postavljanje i analiza zahteva, projekat sistema sa stanovišta pouzdanosti, proračun pouzdanosti i različite analize koje se sprovode (kao što su FMEA, FTA, RBD i

dr.) u cilju procene nivoa pouzdanosti, određivanja kritičnih elemenata, efekata otkaza elemenata na sistem i okolinu, i dr. Teorijska osnova, koja može da posluži za praktično projektovanje pouzdanosti sistema je izložena u monografiji istog autora [1,2].

Kroz fazu razvoja, ostvaruje se nivo pouzdanosti proizvoda. Za inženjersku praksu i upotrebu proizvoda bitno je merenje pouzdanosti (kao i parametara pouzdanosti), kao i potvrda/verifikacija da je zahtevani nivo pouzdanosti ostvaren. Merenje i verifikacija pouzdanosti čine testiranje pouzdanosti. Imajući u vidu značaj pouzdanosti proizvoda, testiranje pouzdanosti čini neophodan deo, i danas rastuću oblast, i u teorijskom i u eksperimentalnom domenu.

Na ovom mestu je prikazan statistički metod testiranja pouzdanosti proizvoda, u slučaju kada se pretpostavlja da zakonitost otkaza odgovara eksponencijalnoj raspodeli. Pokazane su statističke relacije za ocenu intervala poverenja i granica (donje i gornje) srednjeg vremena između otkaza. Razmatrani su uticajni parametri: nivo poverenja, broj jedinica u testu i broj otkaza. Izložena metodologija je primenljiva na široki spektar proizvoda.

Eksponencijalna raspodela - vrste testa

Eksponencijalna raspodela se veoma često koristi u analizi pouzdanosti i testiranju proizvoda. Ova raspodela može da opiše distribuciju vremena otkaza komponente, opreme ili složenih sistema koji imaju karakteristiku konstantnog intenziteta otkaza (ili slučajni otkazi) s vremenom rada. Eksponencijalna raspodela je jednoparameterska:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0; \quad \lambda > 0 \quad (1)$$

gde su: λ (o/satu)=const.– parametar nazvan intenzitet otkaza $\lambda=1/m$, m (sati)– srednje vreme do/između otkaza, t (sati)- vreme.

¹⁾ LOLA institut, 11000 Beograd, Kneza Višeslava 70a

Srednje vreme do/između otkaza, matematičko očekivanje, je:

$$E(t) = \bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = m = MTBF \quad (2)$$

Srednje vreme do/između otkaza može da se odredi na osnovu ispitivanja ili iz podataka o eksploataciji sistema. Ako je N jedinica u testu s vremenom testiranja t_d , i ako otkaze r jedinica, tada se procena srednjeg vremena između otkaza može da odredi iz:

$$\hat{m} = \frac{T_a}{r} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r)t_d}{r} \quad (3)$$

gde su: T_a – ukupno vreme rada svih jedinica, $\sum_{i=1}^r t_i$ - vreme rada jedinica koje su otkazale, a $(N-r)t_d$ - vreme rada jedinica koje nisu otkazale.

Obično se koriste četiri vrste testa:

1. Test ograničen otkazima (*Failure Terminated Test*) sa zamenom otkazale jedinice. Ukupno vreme rada svih jedinica je $T_a = (N) \cdot t_d$, sa r otkaza,
2. Test ograničen otkazima (*Failure Terminated Test*) bez zamene otkazale jedinice. Ukupno vreme rada svih jedinica je $T_a = \sum_{i=1}^r t_i + (N-r) \cdot t_d$, sa r otkaza. Najčešće se test izvodi tako da sve jedinice u testu otkazu, pa je $N = r$ i ukupno vreme rada svih jedinica je $T_a = \sum_{i=1}^r t_i$,

odnosno procena srednjeg vremena između otkaza može da se odredi iz:

$$\hat{m} = \frac{T_a}{r} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r} \quad (3a)$$

3. Vremenski ograničen test (*Time Terminated Test*) sa zamenom otkazale jedinica. Ukupno vreme rada svih jedinica je $T_a = (N) \cdot t_d$, sa r otkaza,
4. Vremenski ograničen test (*Time Terminated Test*) bez zamene otkazale jedinica. Ukupno vreme rada svih jedinica je $T_a = \sum_{i=1}^r t_i + (N-r) \cdot t_d$, sa r otkaza.

Koristi se i dvoparameterska eksponencijalna raspodela:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}, \quad t \geq \gamma; \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

s parametrom lokacije γ .

Test λ

Testira se nulta hipoteza, da je intenzitet otkaza jednak početnoj vrednosti:

$$H_0: \lambda = \lambda_0$$

suprotno alternativnoj hipotezi, da je intenzitet otkaza manji od početne vrednosti:

$$H_1: \lambda = \lambda_1 < \lambda_0$$

Neyman-Pearsonova lema [3] definiše oblast odbijanja nulte hipoteze kao odnos funkcija verodostojnosti:

$$\begin{aligned} \frac{L_1(t_1, t_2, \dots, t_r | \lambda = \lambda_1)}{L_2(t_1, t_2, \dots, t_r | \lambda = \lambda_0)} &= \\ &= \frac{\lambda_1^r e^{-\lambda_1(t_1+t_2+\dots+t_r)}}{\lambda_0^r e^{-\lambda_0(t_1+t_2+\dots+t_r)}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^n e^{(\lambda_0-\lambda_1)\sum_{i=1}^r t_i} > k \end{aligned} \quad (5)$$

Ako je $\lambda_1 < \lambda_0$, tada odnos funkcija verodostojnosti zavisi od $\sum_{i=1}^r t_i$ i monotono raste sa porastom $\sum_{i=1}^r t_i$. Uslov (5) da je odnos funkcija verodostojnosti veći od k može da se ekvivalentno predstavi kao uslov da je zbir $\sum_{i=1}^r t_i$ veći od neke konstante k' . Sledi da će oblast odbacivanja nulte hipoteze (5) biti ekvivalentna:

$$\sum_{i=1}^r t_i > k' \quad (6)$$

Iz (6) se pokazuje da oblast odbacivanja H_0 ne zavisi od vrednosti λ_1 već od činjenice da je $\lambda_1 < \lambda_0$.

Verovatnoća greške tipa I je:

$$P\left\{\sum_{i=1}^r t_i > k' | \lambda = \lambda_0\right\} = \alpha \quad (7)$$

odnosno,

$$P\left\{2\lambda \sum_{i=1}^r t_i > 2\lambda k' | \lambda = \lambda_0\right\} = \alpha \quad (8)$$

Pošto je χ^2 promenljiva (sa: $v=2r$ stepeni slobode za test ograničen otkazima i $v=2r+2$ stepeni slobode za vremenski ograničen test) određena kao [Gibra]

$\chi_{2r}^2 = 2\lambda \sum_{i=1}^r t_i$ to je, za $\lambda = \lambda_0$, uslov (8):

$$P\left\{\chi_{2r}^2 > 2\lambda_0 k'\right\} = \alpha \quad (9)$$

Iz (9) sledi $\chi_{1-\alpha; 2r}^2 = 2\lambda_0 k'$, odnosno $k' = \frac{\chi_{1-\alpha; 2r}^2}{2\lambda_0}$, pa je uslov (6):

$$\sum_{i=1}^r t_i > \frac{\chi_{1-\alpha; 2r}^2}{2\lambda_0} \quad (10)$$

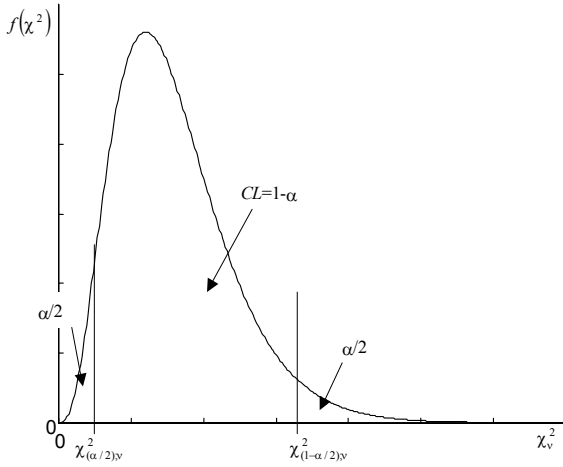
Uslov (10) određuje granicu odbacivanja nulte hipoteze.

Test parametra m - vremenski ograničen test

Test srednjeg vremena između otkaza m može da se izvede analogno prethodnim relacijama (8). Pošto je $\lambda=1/m$ i kako je $T_a = (N) \cdot t_d$ sa r otkaza u vremenski ograničenom testu sa zamenom otkazale jedinice, to je χ^2 promenljiva sa $v=2(r+1)$ stepeni slobode određena kao $\chi_{2(r+1)}^2 = 2r \frac{\hat{m}}{m}$.

Verovatnoća da će se promenljiva $\chi_{2(r+1)}^2 = 2r \frac{\hat{m}}{m}$ naći između donje i gornje granice, sl.1, jeste:

$$P\left(\chi_{\alpha/2;2(r+1)}^2 \leq 2r \frac{\hat{m}}{m} \leq \chi_{(1-\alpha/2);2(r+1)}^2\right) = CL = 1 - \alpha \quad (11)$$



Slika 1. Raspedela promenljive $\chi_{2(r+1)}^2 = 2r \frac{\hat{m}}{m}$, donja i gornja granica određene sa nivoom značajnosti α

Iz (11) sledi:

$$P\left(\frac{2r\hat{m}}{\chi_{(1-\alpha/2);2(r+1)}^2} \leq m \leq \frac{2r\hat{m}}{\chi_{\alpha/2;2(r+1)}^2}\right) = CL = 1 - \alpha \quad (12)$$

odnosno:

$$P(m_{L2} \leq m \leq m_{U2}) = CL = 1 - \alpha \quad (13)$$

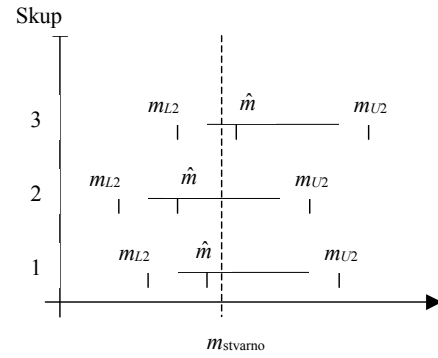
Prethodna relacija pokazuje da postoji verovatnoća $(1-\alpha)$ da će se stvarna vrednost srednjeg vremena između otkaza m nalaziti između donje i gornje granice. Dvostrana donja (m_{L2}) i gornja (m_{U2}) granica srednjeg vremena između otkaza m su određene relacijama:

$$m_{L2} = \frac{2r\hat{m}}{\chi_{(1-\alpha/2);2(r+1)}^2} \quad (14)$$

$$m_{U2} = \frac{2r\hat{m}}{\chi_{\alpha/2;2(r+1)}^2} \quad (15)$$

Kumulativne vrednosti promenljive χ^2 za različite vrednosti α i stepene slobode ν mogu da se nađu u tabeli u [2].

Ocena srednje vrednosti između otkaza $\hat{m} = \frac{T_a}{r} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r}$, za svaki test skupa, nalazi se između donje i gornje granice, sl.2.



Slika 2. Donja i gornja granica srednjeg vremena između otkaza, kao i stvarna vrednost cele populacije

Ako bi se test ponovio sa skupovima 2,3,... dobile bi se druge vrednosti za ocenu srednjeg vremena između otkaza, kao i donje i gornje granice. Kada broj skupova raste, tada ocena srednje vrednosti vremena između otkaza teži stvarnoj vrednosti cele populacije $m_{stvarno}$. Za jedan skup postoji mogućnost da se $m_{stvarno}$ nađe van granica (m_{L2}) i (m_{U2}) za taj skup, ali u $100(1-\alpha)\%$ slučajeva stvarna vrednost m će se naći između donje i gornje granice, kao što je iskazano relacijom (13).

Analogno dvostranoj granici, može da se odredi jednostrana donja granica iz uslova:

$$P(m \geq m_{L1}) = CL = 1 - \alpha \quad (16)$$

gde je jednostrana donja granica određena izrazom:

$$m_{L1} = \frac{2r\hat{m}}{\chi_{(1-\alpha);2(r+1)}^2} = \frac{2T_a}{\chi_{(1-\alpha);2(r+1)}^2} \quad (17)$$

Uslov:

$$P(m \leq m_{U1}) = CL = 1 - \alpha \quad (18)$$

određuje jednostranu gornju granicu srednjeg vremena između otkaza:

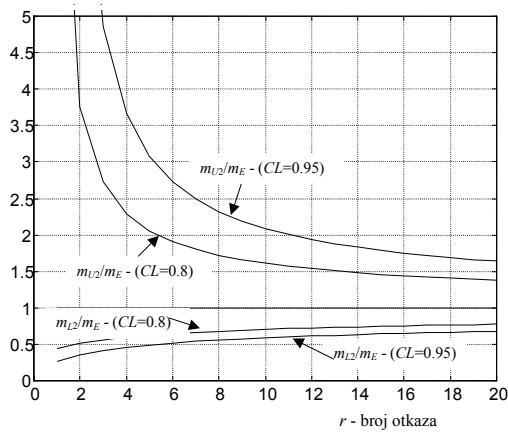
$$m_{U1} = \frac{2r\hat{m}}{\chi_{\alpha;2(r+1)}^2} \quad (19)$$

Prethodne relacije daju mogućnost ocene srednje vrednosti između otkaza \hat{m} , i izračunavanje dvostrane donje (m_{L2}) i gornje (m_{U2}) granice, ili jednostrane donje (m_{L1}) odnosno jednostrane gornje (m_{U1}) granice. Relacije su izvedene za vremenski ograničen test.

Uticaj nivoa poverenja i veličine skupa (broja jedinica u testu)

Nivo poverenja ima uticaja na granice srednjeg vremena između otkaza [4,5]. Niži nivo poverenja daje uže granice i obrnuto (sl.3). Na sl.3 su prikazane normalizovane vrednosti dvostrane gornje ($\frac{m_{U2}}{\hat{m}}$) i donje ($\frac{m_{L2}}{\hat{m}}$) granice, zavisno od broja otkaza r i nivoa poverenja CL .

Ukoliko broj jedinica u testu (broj otkaza r) raste, smanjuje se oblast između gornje i donje granice m , pri istom nivou poverenja CL , sl.3. Gornja i donja granica se približavaju i teže ocenjenoj vrednosti \hat{m} , kada se značajno povećava broj otkaza, i u graničnom slučaju kada broj otkaza teži beskonačno, ocenjena vrednost \hat{m} , će težiti stvarnoj vrednosti m .



Slika 3. Relativni odnos dvostrane gornje ($\frac{m_{U2}}{\hat{m}}$) i donje ($\frac{m_{L2}}{\hat{m}}$) granice u zavisnosti od broja otkaza r i nivoa poverenja CL

Na sl.3 se takođe vidi, da je gornja granica šira od donje granice u odnosu na ocenjeno \hat{m} .

Granice pouzdanosti

Za eksponencijalnu funkciju, pouzdanost je određena parametrom m - srednjim vremenom između otkaza:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{m}} \quad (20)$$

Dvostrana donja i gornja granica pouzdanosti mogu da se odrede na osnovu (m_{L2}) i (m_{U2}):

$$R_{L2} = e^{-\frac{t}{m_{L2}}} \quad (21)$$

$$R_{U2} = e^{-\frac{t}{m_{U2}}} \quad (22)$$

Verovatnoća da će se pouzdanost naći između donje i gornje granice data je izrazom:

$$P(R_{L2} \leq R \leq R_{U2}) = CL = 1 - \alpha \quad (23)$$

Na sličan način može da se pokaže jednostrana donja granica pouzdanosti:

$$R_{L1} = e^{-\frac{t}{m_{L1}}} \quad (24)$$

s verovatnoćom:

$$P(R \geq R_{L1}) = CL = 1 - \alpha \quad (25)$$

Za gornju granicu pouzdanosti relacije su:

$$R_{U1} = e^{-\frac{t}{m_{U1}}} \quad (26)$$

s verovatnoćom:

$$P(R \leq R_{U1}) = CL = 1 - \alpha \quad (27)$$

Operativna karakteristika (OC)

Operativna karakteristika pokazuje verovatnoću prihvatanja testa, zavisno od stvarne vrednosti srednjeg vremena između otkaza m .

Na početku testiranja se postavlja minimalna dozvoljena

vrednost srednjeg vremena između otkaza m_L , ili granična vrednost m_G . Osnovni uslov testa jeste, da dobijena ocena srednjeg vremena između otkaza bude veća od minimalno dozvoljene vrednosti:

$$\hat{m} > m_L \quad (28)$$

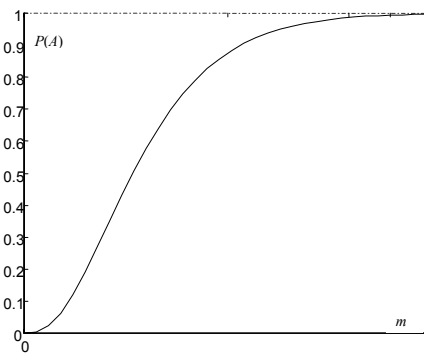
Verovatnoća prihvatanja testa, odnosno verovatnoća da će dobijena ocena srednjeg vremena između otkaza biti veća od minimalno dozvoljene vrednosti, zavisi od stvarne vrednosti m (koje je nepoznato):

$$P(A) = P(\text{Prihvatanja}) = P(\hat{m} > m_L | m) = \alpha \quad (29)$$

Ako se uslov (29) pomnoži sa $2r/m$ i uvede poznata zamena $\chi_{2(r+1)}^2 = 2r \frac{\hat{m}}{m}$, tada je verovatnoća prihvatanja testa (29) iskazana kao:

$$P(A) = P\left(\chi_{2(r+1)}^2 \geq \frac{2rm_L}{m} | m\right) = \alpha \quad (30)$$

Izraz (30) predstavlja operativnu karakteristiku (OC), odnosno zavisnost prihvatanja testa od stvarne vrednosti srednjeg vremena između otkaza m . Ova karakteristika je predstavljena u obliku dijagrama, sl.4.

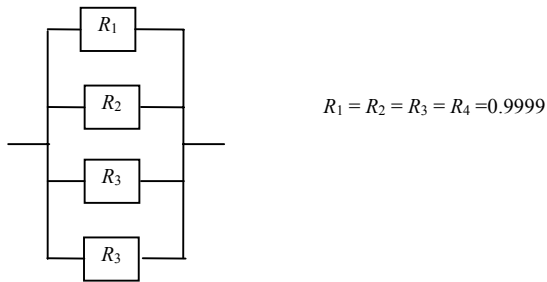


Slika 4. Operativna karakteristika za test

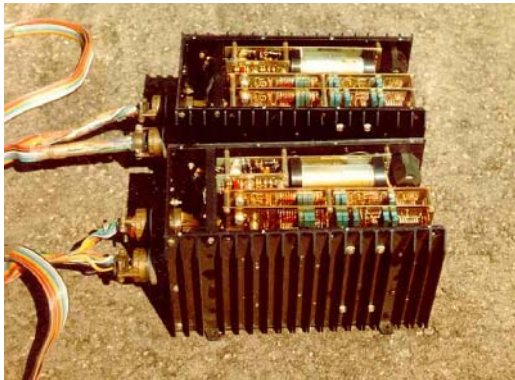
Bitno je naglasiti da verovatnoća prihvatanja testa zavisi od stvarne vrednosti m . Na verovatnoću prihvatanja testa utiče i broj jedinica u testu n , broj otkaza r , odnosno ukupno vreme testiranja T_a .

Primer iz prakse – vremenski ograničen test

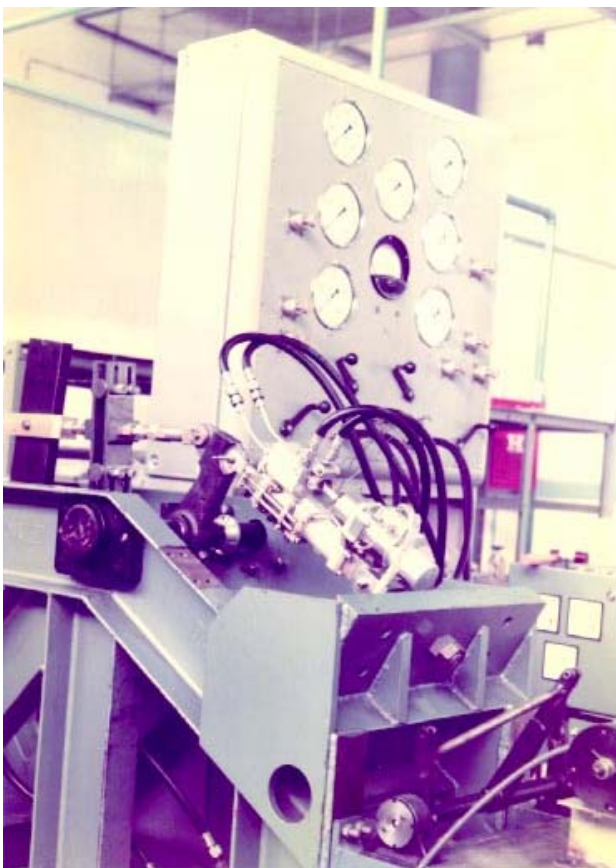
Električni sistem upravljanja letom (FBW) - komanda pravca na avionu ORAO ('Avion Laboratorija') projektovan je da bi osigurao veoma visok nivo bezbednosti. Sem toga, zahtevano je da sistem funkcioniše i ima mogućnost preživljavanja bilo koja dva elektrootkaza. U cilju ispunjenja zahteva bezbednosti, formirana je arhitektura sistema bazirana na paralelnom radu četiri analogna računara, slike 5 i 6. Proračunski intenzitet otkaza jednog računara je $\lambda_r = 1.106 \times 10^{-4}$ o/satu.



Slika 5. Paralelna veza četiri računara



Slika 6. Izgled realizovanih računara

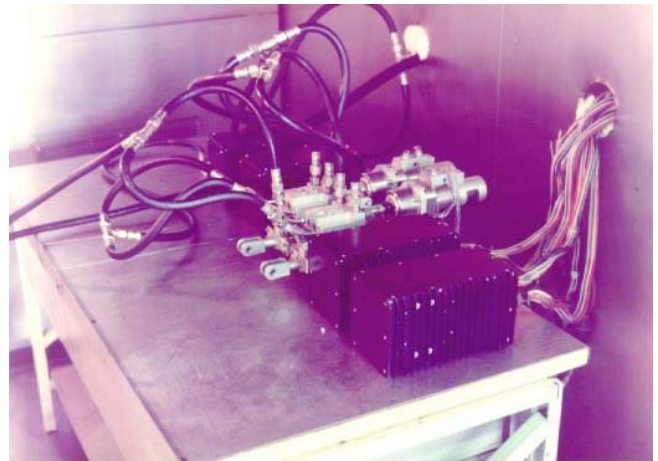


Slika 7. Izgled stola za funkcionalna ispitivanja sistema FBW

U cilju provere zahteva pouzdanosti, urađena je eksperimentalna potvrda. Najpre je izvršeno testiranje funkcionalnosti sistema u projektovanim nominalnim režimima rada, a zatim su simulirani otkazi da bi se verifikovalo zadovoljenje funkcionisanja sistema pri jednom i/ili dva elektrootkaza. Izgled stola za funkcionalna

ispitivanja sistema (PPT, Trstenik) je prikazan na sl.7.

U cilju verifikacije pouzdanosti računara, izvršeno je ispitivanje u klima komori (PPT, Trstenik), sl.8.



Slika 8. Ispitivanje sistema FBW na pouzdanost

Testirano je 8 jedinica (jedna jedinica predstavlja jedan kanal četverostrukog analognog sistema upravljanja letom aviona) 680 sati, pri čemu se zamenjuje (popravlja) otkazala jedinica. Registrovan je jedan otkaz. Potrebno je ispitati da li je *MTBF* jednog kanala veća od 1000 sati. Uzet je nivo značajnosti 0.05.

Za nivo rizika $\alpha = 0.05$ i broj otkaza $r = 1$, vrednost χ^2 promenljive je 9.488 [2]. Donja jednostrana granica m , prema (17), jeste:

$$m_{L1} = \frac{2 \cdot (8 \cdot 680)}{\chi_{(1-0.05); 2(1+1)}^2} = \frac{10880}{9.488} = 1146.7 \text{ sati}$$

Znači, s nivoom poverenja $CL = 0.95$ možemo tvrditi da je *MTBF* jednog kanala veća od 1146.7 sati, što je bolje od zahtevane granice za *MTBF*. Na osnovu rezultata testiranja za nivo rizika od 5%, zaključeno je da se uređaji (računari) mogu da prihvate radi ugradnje u sistem FBW, i da će nivo bezbednosti leta aviona sa električnom komandom pravca biti zadovoljen.

Zaključak

Pouzdanost proizvoda posebno dolazi do izražaja kod proizvoda/sistema čije nefunkcionisanje ili otkazi mogu da dovedu do velikih materijalnih šteta, ekoloških katastrofa ili do ugrožavanja ljudskih života. Treba naglasiti visoke troškove održavanje sistema koji imaju 'nisku' pouzdanost i kratko vreme između otkaza. Zato je potrebno projektovati pouzdan sistem i eksperimentalno verifikovati da je ostvaren zahtevani nivo pouzdanosti. Testiranje pouzdanosti sistema se realizuje obično u dva slučaja: merenje/određivanje nivoa pouzdanosti u fazi razvoja, kao i provera ostvarenog nivoa pouzdanosti serije. Analiza pouzdanosti sistema koristi najčešće zakonitost eksponencijalne raspodele. Primenjuju se dve vrste testa pri testiranju parametra m eksponencijalne raspodele: test ograničen otkazima i vremenski ograničen test.

Prikazana je statistička analiza testa srednje vrednosti između otkaza, pri vremenski ograničenom testu. Pokazane su statističke relacije za određivanje dvostrane donje i gornje granice, jednostrane donje ili gornje granice, i razmatrani uticajni parametri: nivo poverenja, broj jedinica

u testu i broj otkaza.

Pokazan je primer iz prakse. Testiran je analogni računar za upravljanje letom aviona. Zahtev je bio postavljen u obliku minimalne vrednosti srednjeg vremena između otkaza. Eksperiment je obavljen u klima komori sa simulacijom stvarnih uslova rada (promena temperature, uključenja i isključenja, i dr.). Broj jedinica u testu je bio osam, a rezultati testa su pokazali prihvatljiv nivo pouzdanosti računara.

Izložena metodologija je u skladu sa međunarodnim i domaćim standardima [8-11]. Treba posebno koristiti domaće standarde (vojni standard SNO 4264/97) koji iskazuju zahtev za testiranje pouzdanosti proizvoda. Potrebno je istaći da će međunarodna saradnja i realizacija proizvoda za svetsko tržište da nametne potrebu analize pouzdanosti proizvoda i testiranja pouzdanosti u cilju verifikacije postavljenih zahteva.

Literatura

- [1] ZELJKOVIĆ,V. *Pouzdanost u praksi*. LOLA Institut, Beograd, 2000.
 [2] ZELJKOVIĆ,V., MAKSIMOVIĆ,S. *Proračun pouzdanosti*

mehaničkih elemenata i konstrukcija. LOLA Institut, Beograd, 1998.

- [3] GIBRA,N.I. *Probability and Statistical Inference for Scientists and Engineers*. Prentice - Hall, Inc. New Jersey, 1973.
 [4] KECECIOGLU,D. *Reliability & Life Testing Handbook*. Volume 1, Prentice Hall PTR,Upper Saddle River NJ, 1993.
 [5] KECECIOGLU,D. *Reliability & Life Testing Handbook*. Volume 2, Prentice Hall PTR,Upper Saddle River NJ, 1993.
 [6] ZELJKOVIĆ,V. *Analiza pouzdanosti električne komande pravca*. VS-20.815, VTI Žarkovo, 1986.
 [7] ZELJKOVIĆ,V., ĐOKIĆ,I. *Razvoj električnih komandi leta*. Kongres SEV-a, Plovdiv, 1987.
 [8] ...*Definitions of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human Factors, and Safety*, MIL-STD-721 B, 10 March 1970.
 [9] ... *Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production*. MIL - STD - 785 B, 15 September 1980.
 [10] ... *Reliability Design Qualification and Production Acceptance Test: Exponential Distribution*. MIL - STD - 781 C, 21 October 1977.
 [11] ... *POUZDANOST I TRAJNOST* - Provera ispunjenja zahteva za srednje vreme rada do/između otkaza u slučaju eksponencijalne raspodele, SNO 4264/97.

Rad primljen: 12.3.2001.god.

