

## Testiranje pouzdanosti - određivanje životnog veka elemenata vazduhoplovnih konstrukcija

Mr Radomir Vukoje, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Dr Vladimir Zeljković, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Date su teorijske relacije vezane za testiranje pouzdanosti komponente, posebno određivanje srednjeg životnog veka, korisnog životnog veka kao i preostalog životnog veka komponente (ili uređaja). Praktična primena postupka je ilustrovana primerom testiranja lopatica turbomlaznih motora. Podaci testiranja su rađeni za nove lopatice i lopatice koje su bile u operativnoj upotrebi 400, 800 i 1200 sati. Pri analizi rezultata je primenjena lognormalna raspodela. Određen je koristan životni vek novih lopatica i stepen istrošenosti životnog veka posle određenog vremena rada lopatica.

*Ključne reči:* Pouzdanost, testiranje, životni vek, procena.

### Opšti aspekti

**O**DREĐIVANJE životnog veka elemenata i uređaja ima široku primenu. Posebno treba istaći dinamički opterećene mehaničke elemente, čije se opterećenje menja po amplitudi i kada je vrednost amplitude takva da se ulazi u oblast plastičnih deformacija. Problem dinamičkog opterećenja, zamora materijala i loma je izražen kod elemenata s takvim geometrijskim oblikom da se javljaju velike koncentracije napona. Pojava zamora materijala se može javiti u regularnom radu sistema. Međutim, problem je prisutan i kod neregularnog rada, preopterećenja koje može da se javi usled nepredviđenih zaustavljanja/startovanja sistema, nepravilne upotrebe i drugih efekata.

Primera dinamički opterećenih elemenata ima mnogo: zupčanici, vratila, ležajevi, prenosnici i dr. Ovde će se posebno istaći delovi motora koji mogu biti dinamički veoma opterećeni i skloni pojavi zamora materijala i lomu elementa. Na primer delovi avionskih turbomlaznih motora, kao što su lopatice, diskovi, ležajevi, komore i drugo, dinamički su jako opterećeni i imaju ograničen vek trajanja. Ovi elementi se projektuju radi minimizacije mase, pa se dozvoljavaju visoki naponi. Sem toga, ovi su elementi i termički veoma opterećeni, što sve doprinosi značajnom uticaju na zamor i mogućnost loma elemenata.

U fazi razvoja se analitički proračunava (procenjuje) životni vek, dok se stvarna vrednost životnog veka određuje na osnovu testiranja. U praksi je interesantan način testiranja i određivanja životnog veka elementa ili uređaja. Treba napomenuti da se uobičajeno koriste dve koncepcije: koncepcija bezotkaznog veka i koncepcija dozvoljenih oštećenja [1].

Pre početka testiranja je potrebno da se odrede osnovni parametri:

- kriterijum za određivanje životnog veka,

- uslovi testiranja (opterećenje, temperatura, ...) i
- plan testiranja (broj jedinica u testu, očekivano vreme testa, ...).

a) Kriterijumi za određivanje životnog veka mogu biti različiti što zavisi od uređaja/sistema u kome element radi i posledica koje otkaz/lom imaju na funkcionisanje uređaja, na izazivanje materijalnih šteta, velikih katastrofa ili ugrožavanje ljudskih života. Obično se kriterijumi iskazuju u tri oblika:

1) Životni vek komponente/uređaja se određuje kao:

$$T_V = \bar{T} - k \cdot s_T \quad (1)$$

gde su:  $T_V$  - životni vek,  $\bar{T}$  - srednja vrednost merenih rezultata,  $s_T$  - standardna devijacija merenih rezultata,  $k$  - faktor koji se određuje za odgovarajući element.

Opisani način određivanja životnog veka je pogodan kada se testira veći broj jedinica i kada se očekuje da otkazi slede približno normalnu raspodelu. Prethodni izraz za određivanje životnog veka se koristi i kod lognormalne raspodele tako što se umesto  $T$  koristi  $\log T$ . Faktor  $k$  se najčešće bira kao  $k=3$  ili  $k=4$ . Poznato je da kod normalne raspodele ispod vrednosti promenljive od tri standardne devijacije  $\bar{T} - 3 \cdot s_T$  je površina  $P(T \leq \bar{T} - 3 \cdot s_T) = 0.0013499$ . Ovo znači, da ako bi se usvojio faktor  $k=3$ , postoji verovatnoća 0.13499% da će element otkazati pre isteka životnog veka određenog kao  $T_V = \bar{T} - 3 \cdot s_T$  sati. Ako se usvoji faktor  $k=4$ , tada postoji verovatnoća 0.0031671% da će element otkazati pre isteka životnog veka određenog kao  $T_V = \bar{T} - 4 \cdot s_T$  sati, odnosno pouzdanost/verovatnoća da će element preživeti životni vek je 0.99997.

2) Životni vek se određuje kao verovatnoća  $P$  da neće doći do otkaza elementa u životnom veku, odnosno pouzdanost ili verovatnoća da će element preživeti

<sup>1)</sup> Vazduhoplovni zavod 'MOMA STANOJLOVIĆ', 11000 Beograd - Batajnica

<sup>2)</sup> LOLA Institut, 11000 Beograd, Kneza Višeslava 70a

životni vek je:

$$R = P(T \geq T_V) = 1 - \alpha \quad (2)$$

Verovatnoća da će doći do otkaza u životnom veku je:

$$P(T < T_V) = \alpha \quad (3)$$

Parametar  $\alpha$  se bira zavisno od sistema i posledica koje otkaz elementa može da ima na sistem i okolinu. Na primer, ako se usvoji  $\alpha = 0.00003$ , verovatnoća da će element preživeti životni vek je 0.99997. Kao primer se mogu uzeti vazduhoplovne helikopterske strukture [2,3] gde se navodi zahtev od 'šest devetki' za pouzdanost na zamor.

3) Životni vek se određuje kao verovatnoća  $P = \alpha$  da neće doći do otkaza elementa u životnom veku  $T_V$  određeno nivoom poverenja  $CL = 1 - \gamma$ :

$$P[P(T \leq T_V) = \alpha] = CL \quad (4)$$

Ovakav način određivanja životnog veka se koristi pri testiranju manjeg broja jedinica i kada se želi postići veća sigurnost dobijenih rezultata [4,5].

b) Uslovi testiranja se određuju na osnovu tehničkih, ekonomskih, vremenskih i drugih faktora. Međutim, osnovna težnja je da se uslovi testiranja što više približe realnim uslovima rada jedinica. Najadekvatniji način je testiranje elementa/uređaja u realnim uslovima, merenje otkaza (broj otkaza i vreme svakog otkaza - umesto vremena može da se beleži broj ciklusa) i statistička obrada rezultata radi određivanja životnog veka. Međutim, ponekad realna merenja mogu da budu dugotrajana i/ili veoma skupa, pa se u praksi, pri testiranju i određivanju životnog veka, primenjuju simulirani uslovi rada koji odgovaraju stvarnim uslovima. Takođe, primenjuju se i ubrzane metode kojima značajno mogu da se smanje vreme i troškovi testiranja, a da rezultati budu verodostojni. Realni uslovi rada obuhvataju promene opterećenja, temperature, pritiska, uključenja i isključenja (startovanje i zaustavljanje), uticaje agresivne sredine, elektromagnetne i zvučne uticaje i dr. Pri formiranju uslova ispitivanja potrebno je koristiti standarde, kao npr. MIL standarde, koji definišu način formiranja spektra opterećenja, klimamehantičke i druge uslove.

c) Plan testa se formira pre početka testiranja sa osnovnim ciljem da se postigne visok nivo poverenja dobijenih rezultata. Pri tome se vodi računa o realnim ograničenjima kao što su:

- raspoloživi broj jedinica za testiranje  $n$ ,
- izvođenje uslova testiranja tako da što bliže iskazuju realne uslove rada uređaja/elementa,
- vreme testiranja,
- način evidentiranja merenja i metodologija obrade rezultata i dr.

Na osnovu dobijenih podataka merenja vremena otkaza svake jedinice u testu, vrši se obrada rezultata i određivanje životnog veka. Analiza rezultata obuhvata:

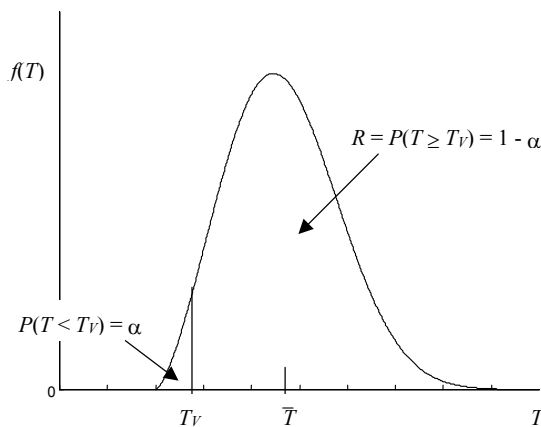
- (i)- određivanje srednje vrednosti i standardne devijacije i
- (ii)- određivanje raspodele i parametara raspodele, koja najbolje sledi merene podatke.

Određivanje srednje vrednosti i standardne devijacije se vrši primenom poznatih relacija:

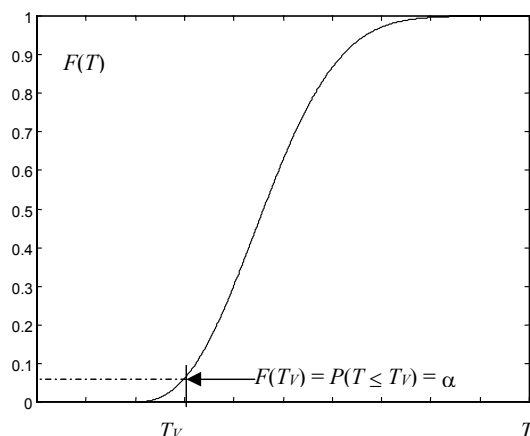
$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (5)$$

$$s_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n - 1} \quad (6)$$

Određivanje raspodele i parametara raspodele se vrši metodom grupisanja podataka ili metodom rangiranja. Ove metode su izložene u [4-7]. Kao rezultat se dobija funkcija gustine raspodele i kumulativna funkcija za skup, odnosno populaciju, sl.1.



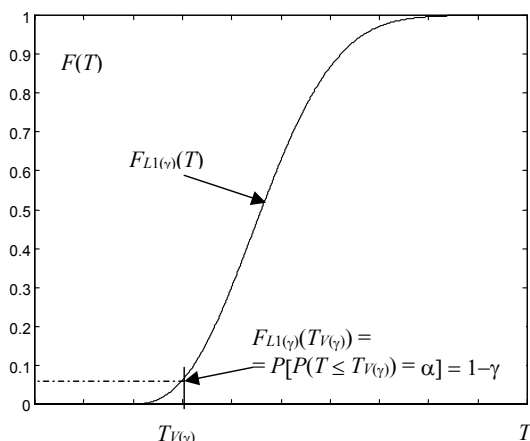
a) Funkcija gustine raspodele



b) Kumulativna funkcija

Slika 1. Funkcija gustine raspodele i kumulativna funkcija

Može se, takođe, odrediti (jednostrana) gornja granica kumulativne funkcija s nivoom značajnosti  $\gamma$  (koja odgovara donjoj granici pouzdanosti), sl.2.



Slika 2. Gornja granica kumulativne funkcije određena za verovatnoću  $(1 - \gamma)$

U određivanju životnog veka najčešće se koriste normalna, lognormalna i Weibullova raspodela.

Vezano za životni vek, značajne su dve grupe analiza:

- određivanje srednjeg životnog veka  $\bar{T}$  i
- određivanje (korisnog) životnog veka  $T_V$ .

Treba takođe napomenuti veliku primenu ubrzanih metoda testiranja, koje mogu da posluže za određivanje i proveru životnog veka elementa.

### Srednji životni vek

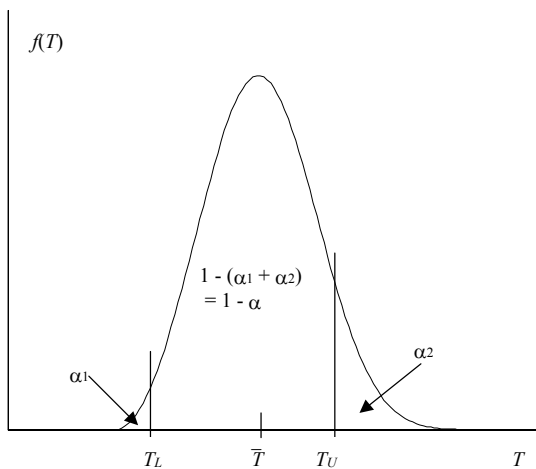
Srednji životni vek je srednja vrednost ili očekivano vreme otkaza identičnih jedinica koje rade u jednakim uslovima. Za poznatu funkciju raspodele  $f(T)$ , srednji životni vek jedinice može da se odredi kao matematičko očekivanje ili prvi moment:

$$\bar{T} = m = \int_{0(-\infty)}^{+\infty} T f(T) dT \quad (7)$$

Praktično, na bazi podataka merenja, srednji životni vek se određuje/procenjuje kao srednja vrednost vremena otkaza (5).

U praksi je ponekad od interesa odrediti verovatnoću otkaza (elementa ili sistema) u nekom intervalu vremena ( $T_L, T_U$ ) između donje ( $T_L$ ) i gornje ( $T_U$ ) granice, sl.3:

$$P(T_L \leq T \leq T_U) = 1 - \alpha \quad (8)$$



Slika 3. Vremenski interval i verovatnoća otkaza

Za rešavanje relacije (8), neophodno je poznavanje raspodele.

Srednji životni vek je značajan kao pokazatelj za planiranje održavanja (planiranje rezervnih delova), uz uslov da se dozvoli rad elementa/uređaja do otkaza. Međutim, u praksi se izbegava mogućnost da komponenta radi do otkaza, pre svega zato što pojedini otkazi mogu imati teške posledice na sistem i okolinu. Rad elementa/uređaja se ograničava na životni vek kraći od srednjeg životnog veka.

### Koristan životni vek

Praktično se životni vek elementa/uređaja ograničava tako da se, sa dovoljno sigurnosti, izbegava mogućnost otkaza. Osnovno je pitanje, koja je to dovoljna mera sigurnosti da se izbegne otkaz elementa u upotrebi? Ako se

suviše 'skrati' životni vek, tada se povećava verovatnoća i sigurnost da element neće otkazati u radu, ali je potrebna 'česta' zamena elemenata što je ekonomski nepovoljno. Znači, najčešće se osnovna dilema postavlja između sigurnosti funkcionisanja i ekonomskih troškova vezanih za zamenu elemenata. Kompromis se nalazi za svaku jedinicu zavisno od njenog značaja za funkcionisanje čitavog sistema. Često se koriste i (međunarodni i domaći) standardi kao pokazatelji donjeg nivoa sigurnosti funkcionisanja sistema (odnosno elemenata).

Tri osnovna kriterijuma za određivanje životnog veka opisani su u prethodnom odeljku. Ovde će se pokazati primena i način određivanja životnog veka u slučaju da funkcija gustine raspodele otkaza sledi normalnu, odnosno lognormalnu raspodelu.

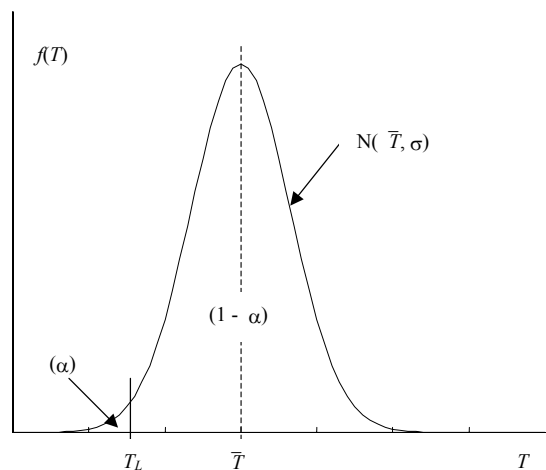
### Normalna raspodela

a) Normalna raspodela, poznata varijansa  $\sigma^2$

U slučaju normalne raspodele s poznatom varijansom (ili  $n \geq 25$ ), donja granica intervala može da se odredi pomoću  $z$  promenljive, sl.4, kao:

$$T_L = \bar{T} + z_{\alpha} \cdot \sigma \quad (9)$$

gde je  $z_{\alpha}$ - vrednost promenljive standardne normalne raspodele za koju je kumulativna funkcija  $\alpha$ .



Slika 4. Jednostrana donja granica

b) Normalna raspodela, nepoznata varijansa  $\sigma^2$

Za normalnu raspodelu s nepoznatom varijansom (ili  $n \leq 25$ ), donja granica intervala može da se odredi pomoću  $t$  promenljive kao:

$$T_L = \bar{T} + t_{(\alpha);n-1} \cdot s_T / \sqrt{r} \quad (10)$$

gde je  $t_{(\alpha);n-1}$ - vrednost  $t$  promenljive sa  $n-1$  stepen slobode za koju je kumulativna funkcija  $\alpha$ .

c) Normalna raspodela, donja granica i nivo poverenja

Nivo poverenja  $CL = 1 - \gamma$  je verovatnoća da će površina normalne raspodele ispod donje granice biti  $\alpha$ , odnosno:

$$P\{P(T_L \leq T) = \alpha\} = 1 - \gamma \quad (11)$$

Jednostrana donja granica je [1,4,5]:

$$T_{L1} = \bar{T} + K_{n;(\alpha);(\gamma)} \cdot s_T \tag{12}$$

gde su koeficijenti  $K$  određeni preko necentralne  $t$  promenljive za vrednosti  $n, \alpha$  i  $\gamma$ , kao:

$$K_{1;n;(\alpha);(\gamma)} = \frac{1}{\sqrt{n}} t_{(\gamma);n-1;\delta(\alpha)}$$

$t_{(\gamma);n-1;\delta(\alpha)}$  - necentralna  $t$  promenljiva određena sa  $(\gamma), n - 1$  stepen slobode i s parametrom necentralnosti  $\delta(\alpha) = \sqrt{n} \cdot z_{(\alpha)}$ .

Vrednosti koeficijenta jednostrane donje granice normalne raspodele određene kao  $\bar{T} - K_{1;n;\alpha;\gamma} s_T$  su date u tabeli [6].

**Lognormalna raspodela**

Slučajna promenljiva  $T$  ima lognormalnu raspodelu, ako promenljiva  $X$  određena kao njen prirodni logaritam ima normalnu raspodelu, odnosno:

$$X = \ln T \tag{13}$$

Ako je slučajna promenljiva vreme  $T$ , tada je za svako merenje  $t_i$  vrednost promenljive  $X$ :

$$x_i = \ln t_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{13a}$$

Normalna raspodela promenljive  $X$  je:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2} \tag{14}$$

gde su parametri normalne raspodele, srednja vrednost i standardna devijacija, određeni kao:

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{15}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\mu_x^2 \right]} \tag{16}$$

Veza između normalne i lognormalne raspodele može da se nađe pomoću jednakosti površina:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_0^{+\infty} f(t) dt = 1 \tag{17}$$

Na osnovu (13) sledi:

$$dx = \frac{1}{t} dt \tag{18}$$

Kada se (18) uvede u (17), a zatim uvrsti (14), dobija se relacija između normalne i lognormalne gustine raspodele kao:

$$f(t) = \frac{1}{t} f(x) = \frac{1}{t} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2} \tag{19}$$

Za određenu normalnu raspodelu promenljive  $X$  sa parametrima  $\mu_x$  i  $\sigma_x$ , moguće je izvršiti analizu srednjeg životnog veka i korisnog životnog veka prema napred datim relacijama, a zatim relacijom (13) da se odrede vrednosti stvarnog (srednjeg i korisnog) životnog veka (vremena - promenljive  $T$ ).

Potrebno je napomenuti da lognormalna raspodela dobro opisuje zakonitost otkaza pri zamoru mnogih mehaničkih elemenata kao što su delovi motora (diskovi, lopatice,...) [1].

**Procenat istrošenosti životnog veka**

Procenat istrošenosti životnog veka se određuje kao:

$$P_T^i = \frac{T_i}{T_V} \cdot 100\% \tag{20}$$

gde su:  $T_i$  - vreme rada, a  $T_V$  - životni vek (nove) komponente.

Procenat istrošenosti životnog veka može da se odredi pomoću broja ciklusa:

$$P_T^i = \frac{N_V^0 - N_V^i}{N_V^0} [x100\%] \tag{20a}$$

gde su  $N_V^0$ - broj ciklusa do otkaza nove komponente, a  $N_V^i$ - broj ciklusa do otkaza komponente koja je bila podvrgnuta cikličnim opterećenjima, za vreme  $T_i$ .

**Životni vek lopatica**

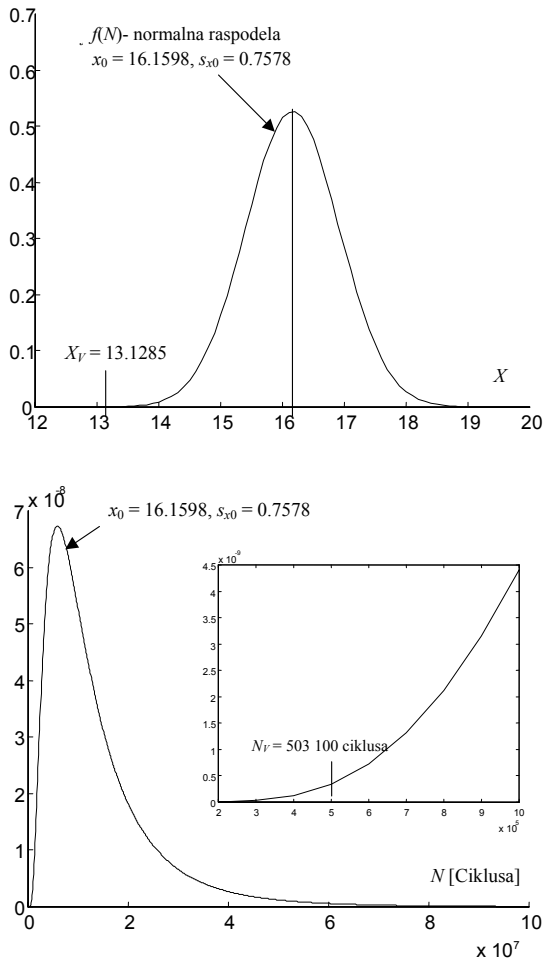
Vršena su ispitivanja novih lopatica, kao i lopatica koje su bile u operativnoj upotrebi 400, 800 i 1200 sati leta. U svakom skupu je bilo po šest lopatica, a ispitivanja su rađena pri naprezanju od 47.3 daN/mm<sup>2</sup>. Rezultati ispitivanja lopatica turbomlaznog motora su dati u tabeli 1, [2]. Cilj je da se odredi vek novih lopatica i stepen istrošenosti sa pouzdanošću (verovatnoćom bezotkaznog rada)  $R = P(T \geq T_V) = 0.99997$ .

**Tabela 1.** Broj ciklusa do otkaza lopatica motora posle 0, 400, 800 i 1200 sati rada

$T_0 = 0.0$ sati $N_{i0} \times 10^6$ [ciklusa]	$T_1 = 400$ sati $N_{i1} \times 10^6$ [ciklusa]	$T_2 = 800$ sati $N_{i2} \times 10^6$ [ciklusa]	$T_3 = 1200$ sati $N_{i3} \times 10^6$ [ciklusa]
4.137	2.2449	1.1549	0.6489
6.813	2.4089	1.8756	1.5210
8.225	4.9335	2.6389	1.5258
8.774	6.6605	4.0857	2.1292
18.275	8.1555	5.9250	3.6807
34.543	12.6343	7.6586	6.3403
$\bar{x}_0 = 16.1598,$ $s_{x0} = 0.7578$	$\bar{x}_1 = 15.4514,$ $s_{x1} = 0.6858$	$\bar{x}_2 = 14.9765,$ $s_{x2} = 0.7158$	$\bar{x}_3 = 14.5347,$ $s_{x3} = 0.7897$
$N_V^0 = 503\ 100$ [ciklusa]	$N_V^1 = 330\ 480$ [ciklusa]	$N_V^2 = 182\ 270$ [ciklusa]	$N_V^3 = 87\ 187$ [ciklusa]

Usvojena je lognormalna raspodela. Na osnovu veze normalne i lognormalne raspodele  $X = \ln N$ , izračunati su parametri normalne raspodele prema relacijama (15 i 16), tabela 1. Životni vek i preostali životni vek (kao broj ciklusa) je određen za verovatnoću otkaza 0.00003 što odgovara tački  $\bar{x}_V - 4 s_V$ , pomoću izraza:  $N_V^i = e^{(\bar{x}_i - 4s_{x_i})}$ .

Životni vek novih lopatica je  $N_V^0 = e^{(16.1598 - 4 \cdot 0.7578)} = 503100$  ciklusa. Funkcije normalne i lognormalne raspodele su prikazane na sl.5.



Slika 5. Funkcije normalne i lognormalne raspodele

Radi potvrde opravdanosti primene lognormalne raspodele, urađen je test hipoteze:

$H_0 : F(N) = F_E(N_{i0})$  - lognormalna raspodela sa parametrima  $x_0 = 16.1598, s_{x0} = 0.7578$ ,

primenom izmenjenog K-S testa [6]. Vrednosti razlika su određene pomoću izraza:

$$D_i^+ = \left| \frac{i}{n} - F_E(N_{i0}) \right| \text{ i } D_i^- = \left| \frac{i-1}{n} - F_E(N_{i0}) \right|$$

i prikazane u tabeli 2. Maksimalne razlike su upoređene sa kritičnim vrednostima  $D_{CR}(\alpha)$  za definisani nivo značajnosti  $\alpha$ . Odabran je nivo značajnosti  $\alpha=0.10$ , pa je za  $n=6$  prema tabeli u prilogu [6] kritična vrednost  $D_{CR}(\alpha = 0.10)=0.470$ .

Tabela 2. Izmenjeni K - S test lognormalne raspodele novih lopatica

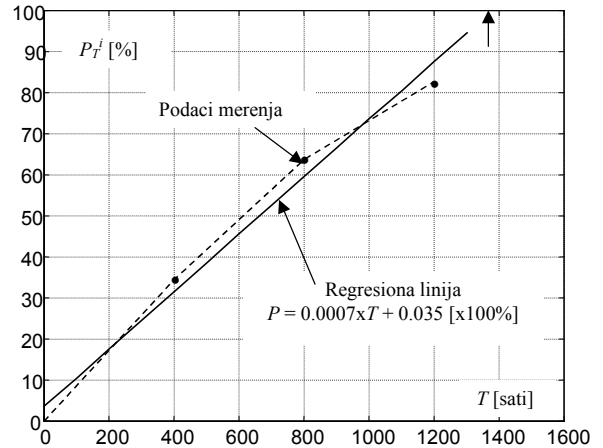
$T_0 = 0.0$ sati $N_{i0} \times 10^6$ [ciklusa]	$F_E(N_{i0})$	$D_i^+$	$D_i^-$
4.137	0.1113	0.0554	0.1113
6.813	0.2873	0.0461	0.1206
8.225	0.3772	0.1228	0.0439
8.774	0.4100	0.2567	0.0900
18.275	0.7706	0.0628	0.1039
34.543	0.9430	0.0570	0.1097
$\bar{x}_0 = 16.1598,$ $s_{x0} = 0.7578$	$\bar{x}_1 = 15.4514,$ $s_{x1} = 0.6858$	$(D_i^+)_{max} = 0.2567$	$(D_i^-)_{max} = 0.1206$
$N_V^0 = 503\ 100$ [ciklusa]	$D_{CR}(\alpha = 0.10) = 0.470 > (D_i^+)_{max} = 0.2567$		

Pošto je zadovoljen uslov izmenjenog K-S testa  $D_{CR}(\alpha = 0.10) = 0.470 > (D_i^+)_{max} = 0.2567$ , sledi da usvojena lognormalna raspodela odgovara merenim podacima i da se može prihvatiti za analizu pouzdanosti lopatica.

Procenat istrošenosti životnog veka je određen kao:

$$P_T^i = \frac{N_V^0 - N_V^i}{N_V^0} [x100\%].$$

Procenat istrošenosti životnog veka dobijen na osnovu rezultata merenja i određen primenom metode najmanjih kvadrata, prikazan je na sl.6.



Slika 6. Procenat istrošenosti životnog veka lopatica turbomlaznog motora

Životni vek i procenat istrošenosti životnog veka lopatica su određivani prema zadatoj pouzdanosti  $R = P(T \geq T_V) = 0.99997$ .

Očigledno je (sl.6), da vreme rada od 1200 sati pokazuje visok nivo istrošenosti životnog veka razmatranih lopatica turbomlaznog motora. Sem toga, regresiona linija ukazuje na sledeće:

- Životni vek  $TV = 1378.5$  sati odgovara istrošenosti životnog veka lopatica 100 % za zadatu pouzdanost  $R = P(T \geq T_V) = 0.99997$ .
- Ukoliko se dozvoli rad lopatica duži od  $TV = 1378.5$  sati, dolazi do smanjenja pouzdanosti i povećanja rizika otkaza lopatica.
- Ukoliko se polazi od sigurnosti, što je uobičajena praksa u eksploataciji, neophodno je zameniti lopatice (povući iz dalje eksploatacije) pre isteka sto procentne istrošenosti životnog veka,  $TV = 1378.5$  sati. Ovo, u suštini, ukazuje na potrebu preventivnog održavanja (remont motora) pre sto procentnog isteka korisnog životnog veka.

Na opisanom primeru je pokazana metodologija određivanja životnog veka. Posebno treba imati u vidu stohastičnost procesa. Iskustva ukazuju na neophodnost potpunog poznavanja uslova upotrebe sistema i komponente, pre svega nivoa opterećenja. Sem toga, inženjerska praksa preporučuje razmatranje i određivanje životnog veka za 'nepovoljne' realne eksploatacione uslove.

### Zaključak

Za komponente i uređaje koji rade u oblasti visokih napona, povišenih temperatura, pod promenljivim opterećenjem, s mogućnošću zamora materijala i loma/otkaza elementa i uređaja neophodna je

eksperimentalna verifikacija dozvoljenog životnog veka. Određivanje dozvoljenog životnog veka spada u oblast pouzdanosti i ostvaruje se primenom teorije verovatnoće i statistike. Ovaj rad daje teorijske relacije vezane za testiranje pouzdanosti komponente. Date su osnovne relacije vezane za određivanje srednjeg životnog veka, korisnog životnog veka kao i preostalog životnog veka komponente ili uređaja.

Praktična primena postupka je ilustrovana primerom testiranja lopatica turbomlaznih motora. Podaci testiranja su rađeni za nove lopatice i lopatice koje su bile podvrgnute cikličnim opterećenjima 400, 800 i 1200 sati. Pri analizi rezultata je primenjena lognormalna raspodela. Određen je koristan životni vek novih lopatica i stepen istrošenosti životnog veka posle određenog vremena rada lopatica.

Izloženi postupak može da se koristi za određivanje životnog veka bilo koje komponente. Primena posebno dolazi do izražaja kod komponenata i uređaja čiji otkazi mogu dovesti do težih posledica za okolinu i ugržavanje bezbednosti ljudi.

## Litaratura

- [1] KECECIOGLU,D.,: *Reliability & Life Testing Handbook*. Prentice Hall PTR,Upper Saddle River NJ, vol 1 i 2, 1993.
- [2] VUKOJE,R.,: *Razvoj metode za ispitivanje na zamor lopatica turbomotora*. Magistarski rad, Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 1995.
- [3] BOORLA,R., ROTENBERGER,K.,: Load Variability of a Two-Bladed Helicopter. *Journal of the American Helicopter Society*, January 1997, p.15-26.
- [4] ZELJKOVIĆ,V.,: *Pouzdanost u praksi*. LOLA Institut, Beograd, 2000.
- [5] KNEŽEVIĆ,J.,: *Reliability, Maintainability and Supportability: a Probabilistic Approach*. McGraw-Hill, London, 1993.
- [6] ZELJKOVIĆ,V., MAKSIMOVIĆ,S.,: *Proračun pouzdanosti mehaničkih elemenata i konstrukcija*. LOLA Institut, Beograd, 1998.
- [7] LEWIS,Z.,: Some Simple Approaches to Reliable Fatigue Damage Prediction. *Journal of the American Helicopter Society*. January 1997, p.79-88.

Rad primljen: 6.6.2001. god.

