

# Softver za analizu pouzdanosti i određivanje broja rezervnih delova u sistemu za održavanje vazduhoplova baziran na Rayleigh-evom modelu

Nataša Kontrec, Stefan Panić, Hranislav Milošević, Danijel Đošić

Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Prištini

Kosovska Mitrovica, Srbija

[natasa\\_radenkovic@yahoo.com](mailto:natasa_radenkovic@yahoo.com), [stefanpnc@yahoo.com](mailto:stefanpnc@yahoo.com), [mhrane@gmail.com](mailto:mhrane@gmail.com), [daniieldjosic@gmail.com](mailto:daniieldjosic@gmail.com)

**Sadržaj**—U ovom radu predstavljen je nov softver za procenu zaliha rezervnih delova u sistemima za održavanje vazduhoplova. On se bazira na inovativnom matematičkom pristupu koji analizira karakteristike pouzdanosti delova vazduhoplova kao i podsklopova i sklopova kojima oni pripadaju. Na osnovu preporuke proizvođača koja se odnosi na prosečan životni vek dela, određuje se nakon koliko časova leta treba vršiti servis i u kom trenutku je potrebno na zalihama imati određeni deo. Baza podataka softvera je hijerarhijska i u potpunosti odgovara sastavnici neophodnoj u održavanju vazduhoplova.

**Ključne reči** - softver za analizu pouzdanosti; održavanje vazduhoplova; rezervni deo;

## I. UVOD

Pouzdanost se definiše kao verovatnoća da se otkaz neće desiti u nekom određenom vremenskom periodu uz poštovanje unapred definisanih uslova [1]. U civilnom vazduhoplovstvu se definiše kao procenat letova koji nisu otkazani ili nije došlo do kašnjenja zbog tehničkih problema.

Raspoloživost je verovatnoća da će sistem, ukoliko se koristi u skladu sa propisima, zadovoljavajuće raditi u određenom vremenskom periodu pod određenim uslovima i uz odgovarajuću logističku podršku. Takva raspoloživost se u literaturi zove još i unutrašnja raspoloživost [2] ili nerazdvojiva raspoloživost (*eng.* Inherent Availability). Danas, pouzdanost možemo posmatrati kao parametar koji ima jednaku važnost kao troškovi ili performanse posmatrang sistema. Usled porasta složenosti sistema [3] smatra se da se pouzdanost mora predstaviti kao njegova kvantitativna mera.

Analizom pouzdanosti i učestalosti otkaza sistema možemo predvideti potreban broj rezervnih delova u trenutku kada dođe do otkaza ili kada pouzdanost pada ispod unapred definisanog nivoa.

Postoji brojna literatura koja se bavi problematikom određivanja potrebnog broja rezervnih delova, posebno kao deo logističke podrške [4]-[7]. U radovima [8]-[10] uglavnom se razmatraju popravljivi rezervni delovi ili upravljanje zalihama u cilju postizanja određene, unapred zadate, raspoloživosti sistema [11]-[13]. Sa druge strane kvantitativne teorije koje se baziraju na teoriji pouzdanosti su korišćene za predviđanje učestalosti otkaza da bi se preciznije odredila

potražnja za određenim rezervnim delom [14]-[16]. Većina metoda razmatrana u literaturi bazira se na Weibull-ovoj ili eksponencijalnoj raspodeli [17]-[18], dok je u ovom radu predložen Rayleigh-ev model analize pouzdanosti kao i softversko rešenje za njegovu lakšu primenu.

## II. MODEL ZA ODREĐIVANJE POUZDANOSTI DELOVA

U analizi pouzdanosti se najčešće koriste eksponencijalni modeli. Glavna pretpostavka ekponencijanih modela je da je vreme između otkaza ekponencijalno raspoređeno i da je funkcija otkaza nezavisna od vremena.

Model predložen u ovom radu se bazira na Rayleigh-ovom modelu [19]. Kao poznate parametre, korišćemo prosečni životni vek komponente (rezervnog dela),  $T_{ut}$  izražen u časovima letenja  $w$  i cenu te iste komponente.

Prosečan životni vek komponente  $T_{ut}$  možemo, pomoću Rayleigh-eve raspodele predstaviti na sledeći način:

$$T_{ut} = E(w) = \int_0^{+\infty} w \frac{w}{x} e^{-\frac{w^2}{x}} dw = \sqrt{x} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

gde  $E(w)$  označava matematičko očekivanje, dok je parametar  $x$  izražen kao  $x=E(w^2)$ . Na osnovu jednačine (1), možemo odrediti funkciju gustine verovatnoće (PDF) raspodele ukupnog životnog veka komponente ( $T_{ut}$ ) na osnovu Rayleigh-evog modela na sledeći način:

$$p(w) = \frac{w\pi}{2T_{ut}^2} \exp\left(-\frac{w^2\pi}{4T_{ut}^2}\right) \quad (2)$$

Slično tome, i kumulativnu funkciju gustine (CDF) raspodele ukupnog životnog veka komponente na osnovu na osnovu Rayleigh-evog modela, tj. verovatnoću da deo neće otkazati u unapred određenom vremenskom intervalu, možemo predstaviti kao:

$$F(w) = 1 - \exp\left(-\frac{w^2 \pi}{4T_{ut}^2}\right) \quad (3)$$

$$\Lambda(w) = \frac{P(w)}{R(w)} \quad (9)$$

Na osnovu jednačine (3) i funkcije pouzdanosti za svaki deo posebno, računamo verovatnoću da u nekom vremenskom intervalu  $[0, w]$  određeni deo neće otkazati:

$$R(w) = 1 - F(w) = \exp\left(-\frac{w^2 \pi}{4T_{ut}^2}\right) \quad (4)$$

Konačno, na osnovu prethodnih jednačina možemo definisati funkciju otkaza. Funkcija otkaza je verovatnoća da će u nekom vremenskom intervalu  $[0, w]$  određeni deo prestati da obavlja svoju funkciju. Ova funkcija predstavlja jednu od osnovnih mera pouzdanosti nekog sistema i, po svojim karakteristikama, to je rastuća funkcija jer je  $F(0)=0$  a  $F(\infty)=1$ . U ovom konkretnom slučaju funkciju otkaza računamo kao:

$$\lambda(w) = \frac{w\pi}{2T_{ut}^2} \quad (5)$$

### III. ODREĐIVANJE POUZDANOSTI SKLOPA

Većina delova aviona pripada nekom podsklopu ili sklopu, i ukoliko jedan deo otkaze može doći do toga da ceo podsklop/sklop prestane sa radom. Da bi odredili pouzdanost podsklopa/sklopa kojem posmatrani delovi pripadaju mi ćemo ih posmatrati kao njihovu rednu vezu.

Na taj način se kumulativna funkcija gustine za ceo sistem može predstaviti jednačinom (6),

$$F(w) = F_{(1)}(w)F_{(2)}(w)\cdots F_{(n)}(w) \quad (6)$$

gde  $F_{(i)}(w)$  predstavlja kumulativnu funkciju gustine i-tog dela posmatranog sistema. Slično tome možemo odrediti funkciju gustine verovatnoće tj. PDF čitavog sistema kao:

$$P(w) = \sum_{i=1}^n p_i(w) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n f_j(w) \quad (7)$$

a na osnovu toga dalje određujemo funkciju pouzdanosti tog sistema, tj. sklopa kojem pripadaju i to na sledeći način:

$$R(w) = 1 - F(w) \quad (8)$$

Funkciju otkaza za ceo sistem, u ovom slučaju sklop, možemo odrediti kao:

### IV. SOFTVER ZA ANALIZU POUZDANOSTI I ODREĐIVANJE BROJA REZERVNIH DELOVA

U tabeli 1 prikazani su konkretni podaci za delove letelice Cessna Citation 560XL koji pripadaju komponenti Ignition. Na osnovu predloženog modela, prikazane su jednačine za izračunavanje parametara pouzdanosti za svaki deo posebno. Kako ručno izračunavanje ili korišćenje nekog alata, poput MATLAB-a nije praktično za korišćenje u sistemima za održavanje vazduhoplova, tako smo dizajnirali softver koji će simulirati gore predstavljen matematički model.

Baza podataka sistema je formirana tako da u potpunosti odgovara strukturi hijerahijske sastavnice koja se koristi u održavanju aviona [20]:

```
id_nad ::= artikl.ID
Id_pod ::= artikl.ID
nivo ::= <NUMBER,5>
redosled ::= <NUMBER,5>
kolicina ::= <NUMBER,5>
cena ::= <NUMBER,10>
```

Aplikacija radi na sledeći način – ukoliko korisnik želi da odredi pouzdanost nekog dela unosi jedinstveni Part Number tog dela ili, eventualno, njegov naziv. Kao odgovor na upit dobija informacije o delu, tj. prosečni životni vek dela dat kao preporuka od proizvođača u časovima leta, zatim, cenu dela izraženu u dolarima (USA), naziv i identifikacioni broj sklopa kome deo pripada.

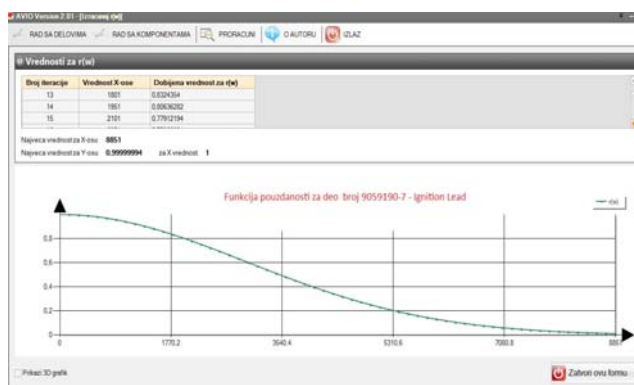
Nakon toga, od korisnika se traži da unese vremenski period u okviru koga želi da proveri performanse dela, tj. kao što se da videti iz gore navedenog modela, korisnik definiše interval od  $[0, w]$ .

Provera pouzdanosti dela se određuje na osnovu jednačine (4). Na primer, ako se unese deo čiji je Part No. 9059190-7 (Ignition lead), rezultat izvršavanja je prikazan na sl. 1. Kao što se može primetiti, moguće je pratiti pouzdanost dela na osnovu tabele ili na osnovu grafikona.

Na osnovu toga, može se u svakom trenutku odrediti pouzdanost određene komponente i srednje vreme otkaza pojedinih komponenti u nekom vremenskom trenutku  $w$ . Funkcija učestalosti otkaza, u modelu predstavljena jednačinom (5), prikazana je na slici 2.

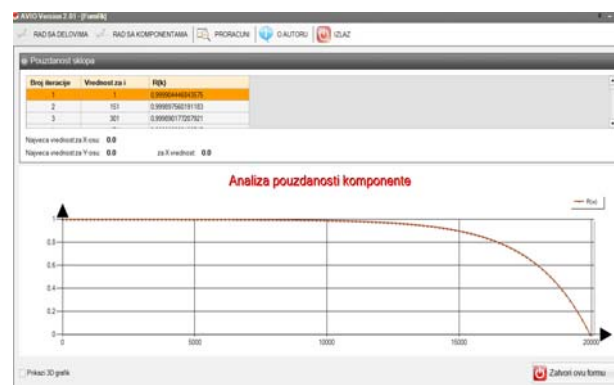
I. TABELA 1 – ANALIZA KARAKTERISTIKA POUZDANOSTI DELOVA

N <sup>o</sup>	Part N <sup>o</sup>	T <sub>ut</sub> (h)	p(w)	F(w)	R(w)	λ(w)
1	9058600-1	807	$\frac{w\pi}{1302498} \exp\left(-\frac{w^2\pi}{2604996}\right)$	$1 - \exp\left(-\frac{w^2\pi}{2604996}\right)$	$\exp\left(-\frac{w^2\pi}{2604996}\right)$	$\frac{w\pi}{1302498}$
2	9059190-7	3727	$\frac{w\pi}{27781058} \exp\left(-\frac{w^2\pi}{55562116}\right)$	$1 - \exp\left(-\frac{w^2\pi}{55562116}\right)$	$\exp\left(-\frac{w^2\pi}{55562116}\right)$	$\frac{w\pi}{27781058}$
3	9059190-8	194	$\frac{w\pi}{75272} \exp\left(-\frac{w^2\pi}{150544}\right)$	$1 - \exp\left(-\frac{w^2\pi}{150544}\right)$	$\exp\left(-\frac{w^2\pi}{150544}\right)$	$\frac{w\pi}{75272}$
4	500335-1	312	$\frac{w\pi}{194688} \exp\left(-\frac{w^2\pi}{389376}\right)$	$1 - \exp\left(-\frac{w^2\pi}{389376}\right)$	$\exp\left(-\frac{w^2\pi}{389376}\right)$	$\frac{w\pi}{194688}$

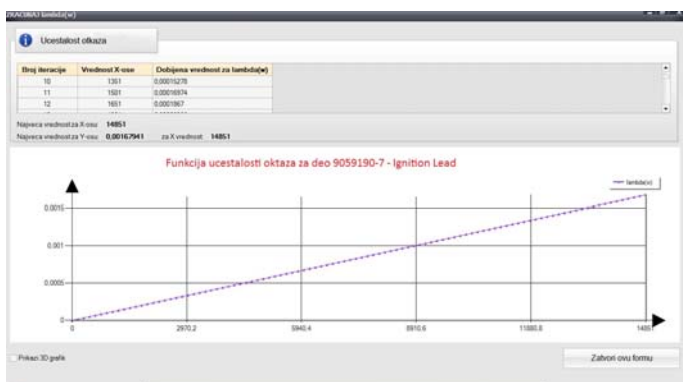


Slika 1. Funkcija pouzdanosti za deo Ignition Plug

da će ta komponenta otkazati. Praćenje časova letenja za svaku letelicu, što je i standard u održavanju, i analiziranje ovih performansi može nam pomoći da donesemo odluku u kom trenutku je potrebnu tu specifičnu komponentu imati na zalihama rezervnih delova.



Slika 3. Funkcija pouzdanosti sklopa/komponente IGNITION



Slika 2. Funkcija učestalosti otkaza za deo Ignition Plug

Dalje, na osnovu jednačina (8) i (9) može biti određena i pouzdanost komponente (sklopa ili podsklopa). Softver analizira pouzdanost komponente, tako što korisnik unese identifikacioni broj komponente ili njen naziv i klikom na dugme pokrene izračunavanje. Prikaz izvršenja ove aktivnosti za sklop koji se sastoji od delova iz *tabele 1* je dat na slici 3.

Analizom pouzdanosti i funkcije otkaza za svaku razmatranu komponentu može se odrediti u kom vremenskom intervalu (odnosno nakon koliko časova letenja) je najveća verovatnoća

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen matematički metod za izračunavanje standardnih performansi delova vazduhoplova u sistemima za njihovo održavanje. U cilju njegove šire primene, napravljen je softver koji u svakom trenutku može da odredi pouzdanost nekog dela koji ulazi u sastav aviona i vremenski interval u kojem će taj deo da otkaze. Takođe, moguće je odrediti i pouzdanost podsklopa ili sklopa kojem ti delovi pripadaju. Na osnovu tih rezultata, planiraju se akcije preventivnog održavanja vazduhoplova i nabavka rezervnih delova koju su neophodni za to održavanje. Samim tim značajno se smanjuju troškovi koji mogu da nastanu usled neraspoloživosti vazduhoplova ili troškovi nezadovoljenog zahteva za rezervnim delom.

## LITERATURA

- [1] C.E. Ebeling. Introduction to reliability and maintainability engineering. McGraw-Hill, 1997.
- [2] Rašuo B., Vazduhoplovnotehničko obezbeđenje, Vojna akademija, Beograd 2003.
- [3] D. Kumar. "Reliability Analysis and Maintenance Scheduling Considering Operating Conditions", Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, 1996
- [4] A Chelbi, and D. Ait-Kadi,. "Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure", International Journal of Production Economics, Vol. 74, No. 2, pp. 183-189, 2001
- [5] W.J. Kennedy, J.W. Patterson, and L.D. Fredendall. "An overview of recent literature on spare parts inventories", International Journal of Production Economics, Vol. 76, No. 2, pp. 201-215, 2002
- [6] J.W. Langford. "Logistics: Principles and Applications", New York: McGraw-Hill Inc, 1995
- [7] D.K. Orsburn,. "Spares Management Handbook", City: McGraw-Hill, 1991
- [8] K.P. Aronis, I. Magou,, R. Dekker, G. Tagaras. "Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: a case study", European Journal of Operational Research, Vol. 154, No. 3, pp. 730-739, 2004
- [9] R Sarker,., and A. Haque. "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation", Applied Mathematical Modeling, Vol. 24, No. 10, pp. 751-760, 2000.
- [10]C.H. Smith, and M.K. Schaefer. "Optimal inventory for repairable redundant systems with aging components", Journal of Operation Management, Vol. 5, No. 3, pp. 339-349, 1985
- [11]S.C. Graves. "A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replacement", Management Science, Vol. 31, No. 10, pp. 1274-1256, 1985
- [12]T.S. Dhakar,, C.P. Schmidt, D.M. Miller. "Base stock level determination for high cost low demand critical repairable spares", Computers and Operations Research, Vol. 21, No. 4, pp. 411-420, 1994
- [13]J. Huiskonen. "Maintenance spare parts logistics: special characteristics and strategic choices", International Journal of Production Economics, Vol. 71, No. 1- 3, pp. 125-133, 2001
- [14]A.K.S. Jardine. "Maintenance, Replacement and Reliability", Ontario, Canada: Preney Print and Litho Inc., 1998
- [15]E.E. Lewis. "Introduction to Reliability Engineering", New York: John Wiley & Sons Inc., 1996
- [16]M. Xie,, H. Kong, and T.N. Goh. "Exponential approximation for maintained Weibull distributed component", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 260-26, 2000
- [17]P.D.T. O'Connor. "Practical Reliability Engineering", 3rd ed., West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 1991
- [18]Hoyland, and M. Rausand. "System Reliability Theory: Models and Statistical Methods", New York: John Wiley & Sons, 1994
- [19]H. Wang, H. Pham, Reliability and Optimal Maintenance, Springer Series in Reliability Engineering ISSN 1614-7839, 2006
- [20]S. Radojević, Č. Mitrović, Arandelović M., Priprema sastavnica u održavanju. XXXIII Naučno-stručni skup Održavanje mašina i opreme, 2008.Radojević S., Mitrović Č., Arandelović M., Priprema sastavnica u održavanju. XXXIII Naučno- stručni skup Održavanje mašina i opreme, 2008.

## ABSTRACT

This paper introduces a new software for spare parts forecasting in aircraft maintenance systems. It relies on a novel approach for determination of reliability characteristics of aircraft parts and sub-assemblies/assemblies these parts belong to. Based on manufacturer's recommendation on average component life, this software calculates after how many flight hours performing of maintenance actions is required and which particular spare parts should be kept in stock. Database is hierarchical and supports the hierarchical Bill of Material (BOM) used in maintenance activities.

### **Software for analyzing reliability and spare parts forecasting in aircraft maintenance systems based on Rayleigh model**

Nataša Kontrec, Stefan Panić, Hranislav Milošević,  
Danijel Došić