

Mr. sc. **Mato Tudor**  
Pomorski fakultet u Rijeci  
Studentska 2, Rijeka

Prethodno priopćenje  
UDK: 629.5.03  
681.5.09

## O POUZDANOSTI BRODSKIH SUSTAVA

*U radu su izloženi načini izračuna pouzdanosti brodskih sustava. Kako je pouzdanost funkcijski ovisna o pojavi kvara, razmatrana je s obzirom na različite vrste kvarova. Kvarovi mogu biti vremenski i slučajni. Vremenski nastaju zbog istrošenosti pojedinih dijelova sustava, a slučajni kojima uzrok može biti različit (npr. nepredviđena naprezanja, greška u rukovanju...) pojavljuju se tijekom čitava razdoblja eksploatacije. Često se događa da sustavi otkazuju zbog pojave jednih ili drugih kvarova pa je posebno razmatrana složena pouzdanost. Kod sustava koji su od bitnog značenja za funkcioniranje, zalihošću se postiže da pouzdanost bude čim veća. Zalihost se sastoji u tome da se osnovnom sustavu pridruži još jedan ili više pričuvnih sustava koji u slučaju otkaza osnovnog sustava preuzimaju njegovo funkcioniranje. U radu je dan i pregled izračuna pouzdanosti kod različitih vrsta zalihosti.*

*Ključne riječi: pouzdanost, brodski sustavi, kvarovi*

### 1. UVOD

Pouzdanost sustava je vjerovatnost da će sustav unutar određenoga promatranog vremenskog razdoblja raditi ispravno odnosno sa zadovoljavajućim performansama. U pravilu, da bi sustav radio ispravno, moraju i sve njegove komponente djelovati ispravno. Međutim, može se dogoditi da pojedina komponenta otkaze zbog kvara, a sustav i dalje radi ispravno. To je uobičajno kod sustava sa zalihošću pojedinih komponenti. Ima slučajeva kada sve komponente djeluju u predviđenim granicama, ali nekoliko njih na samoj granici, pa takav sinergijski učinak dovodi do toga da sustav pravilno ne funkcionira. Takvi kvarovi najčešći su kod elektroničke opreme.

Budući da je pouzdanost mjerilo sposobnosti uređaja da radi zadovoljavajuće dok je u eksploataciji, osnovni parametar pouzdanosti je vrijeme. U neprekidnu radu sustava to je bilo koja vremenska jedinica. Ako uređaj radi povremeno, u pravilnim ili nepravilnim vremenskim razmacima, to može biti i broj operacija ili kombinacija broja operacija i vremena. Npr., logično je govoriti o broju sati rada stroja i računati vjerojatnost da do kvara neće doći u satima rada. Međutim, za sklopku je, npr., logičnije govoriti o broju operacija. Često se može postaviti odnos između broja operacija i broja sati. Ugradimo li istu sklopku u dva

različita sustava, pri čemu u jednom sustavu sklopka ima manji broj operacija u jedinici vremena nego u drugom, u sustavu u kojem je veći broj operacija, njezina je pouzdanost manja.

Prema uzroku, kvarovi se u brodskim sustavima dijele na slučajne i vremenske. Slučajni kvarovi mogu se pojaviti tijekom čitavoga životnog vijeka sustava. Uzrok im se najčešće ne može sa sigurnošću utvrditi. Može se pretpostaviti da su uzrok takvih kvarova naprezanja (mehanička, termička, električna...) koja nisu predviđena pri projektiranju sustava. U slučajne kvarove ubrajaju se i prouzročeni kvarovi kao posljedica nepravilna rukovanja osoblja koje posluhuje sustav (npr. pogrešna montaža, oštećenje pri padu...) ili više sile (npr. prodor mora, požar i slično). Vremenski kvarovi nastaju zbog istrošenosti ili zamora materijala (uporabom se otpornost na kvar smanjuje zbog trošenja materijala, korozije, načistoće, erozije i drugog).

Budući da je funkcija kvara, i pouzdanost se može promatrati s obzirom na njegove uzroke.

## 2. POUZDANOST S OBZIROM NA SLUČAJNE KVAROVE

Pouzdanost je pokazatelj koji označava vjerojatnost koliko će komponenti sustava, od ukupnog broja, ostati ispravno za određeno vrijeme rada.

$$R(t) = \frac{P_o - P_f}{P_o} = 1 - \frac{P_f}{P_o}$$

gdje je:

$R(t)$  – pouzdanost

$P_o$  – ukupan broj komponenti sustava na početku

$P_f$  – broj neispravnih komponenti na kraju vremenskog perioda.

Ovaj izraz pokazuje stanje komponenti sustava na kraju promatranoga vremenskog razdoblja  $t$ . Ako se želi dobiti izraz za bilo koji djelić promatranog vremena:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{P_o} \frac{dP_f}{dt}$$

Ako se s  $P_s$  označe komponente koje su na kraju promatranog razdoblja ostale ispravnima, i pomnoži gornja jednakost sa  $P_o/P_s$ , dobije se:

$$\frac{P_o}{P_s} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{P_s} \frac{dP_f}{dt}$$

Izraz

$$\frac{1}{P_s} \frac{dP_f}{dt}$$

je omjer komponenti u kvaru prema ispravnim komponentama i označava indeks kvarova  $\lambda$ .

Prema tome, bit će:

$$\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = -\lambda$$

Integriranjem se dobije izraz za pouzdanost:

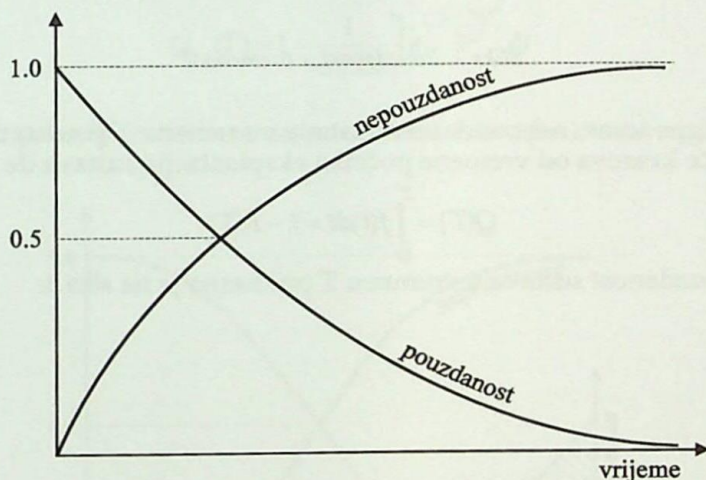
$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Ovaj izraz vrijedi za sustave koji su uspješno prošli početno uhadavanje i još nisu zahvaćeni kvarovima zbog istrošenosti.

Vjerojatnost da će u nekom vremenskom razdoblju pojaviti kvar u sustavu, može se prikazati razlikom između stopostotne i izračunate pouzdanosti. Ta se razlika zove nepouzdanost  $Q(t)$ .

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

Odnos pouzdanosti i nepouzdanosti prikazana je na slici 1.



Slika 1. Odnos pouzdanosti i nepouzdanosti

Funkcija gustoće indeksa kvarova iznosi:

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{P_o} \frac{dP_f}{dt}$$

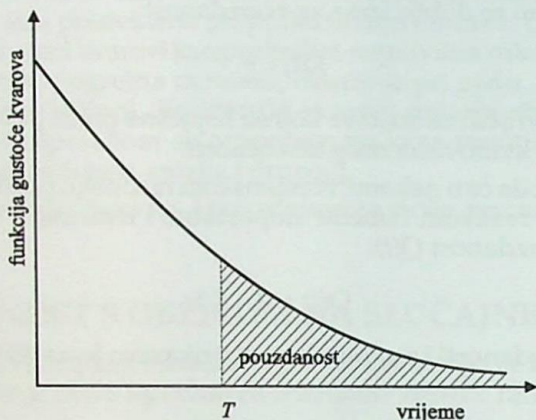
odnosno iz tih jednadžbi slijedi da je:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Pouzdanost sustava u vremenu  $T$  predstavlja površinu ispod funkcije kvarova od vremena  $T$  do beskonačnosti:

$$R(T) = \int_T^{\infty} f(t) dt,$$

kao što je prikazano na slici 2.

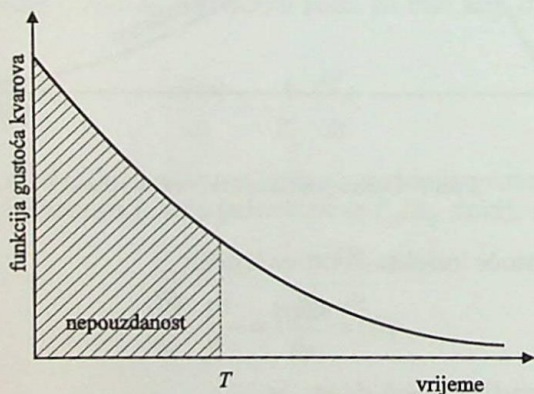


Slika 2. Pouzdanost u vremenu  $T$

Analogno tome, nepouzdanost sustava u vremenu  $T$  predstavlja površinu ispod gustoće kvarova od vremena početka eksploatacije sustava do vremena  $T$ .

$$Q(T) = \int_0^T f(t) dt = 1 - R(T)$$

Nepouzdanost sustava u vremenu  $T$  prikazana je na slici 3.



Slika 3. Nepouzdanost u vremenu  $T$

### 3. POUZDANOST S OBZIROM NA VREMENSKE KVAROVE

Osim slučajnih, i vremenski kvarovi (npr. kvarovi zbog istrošenosti) utječu na pouzdanost. U najvećem broju slučajeva vremenski kvarovi slijede normalnu razdiobu.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}}$$

Integriranjem površine ispod krivulje kvarova od vremena  $T$  do beskonačnosti dobije se izraz za pouzdanost sustava kod vremenskih kvarova –  $R_w$ :

$$R_w(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_T^{\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt$$

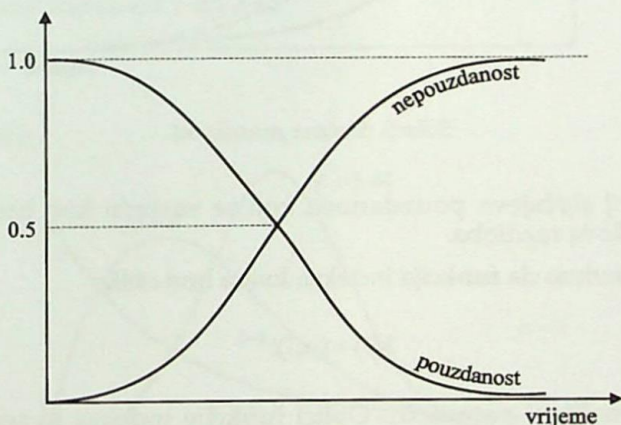
Nepouzdanost  $Q_w$  je dana izrazom:

$$Q_w(T) = 1 - R_w(T)$$

odnosno:

$$Q_w(T) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_T^{\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt$$

Odnos pouzdanosti i nepouzdanosti za vremenske kvarove prikazan je na slici 4.



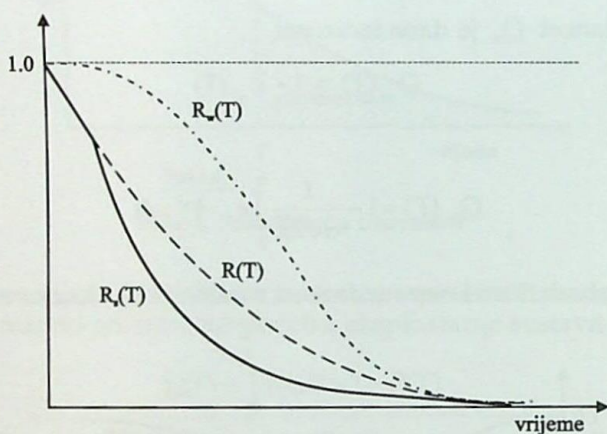
Slika 4. Odnos pouzdanosti i nepouzdanosti

#### 4. SLOŽENA POUZDANOST

U praksi se često događa da kvar nastupa zbog slučajnih uzroka, ali i zbog istrošenosti. U tom slučaju kombinacija normalne i eksponencijalne razdiobe može biti dobar model za pouzdanost sustava. Neka, na primjer, funkcioniranje sustava ovisi o dvjema komponentama, od kojih jedna otkazuje zbog slučajnog kvara, a druga zbog vremenskog kvara. Obje komponente rade neovisno jedna o drugoj, i do kvara na sustavu dolazi kada otkáže bar jedna od komponenti. Pouzdanost sustava tada se prikazuje kao umnožak pouzdanosti njegovih komponenti.

$$R_s(T) = R(T)R_w(T) = e^{-\lambda T} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_T^{\infty} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}} dt$$

Složena pouzdanost prikazana je na slici 5.



Slika 5. Složena pouzdanost

Velik broj slučajeva pouzdanosti koji se susreću kod brodskih sustava pokriva Weibullova razdioba.

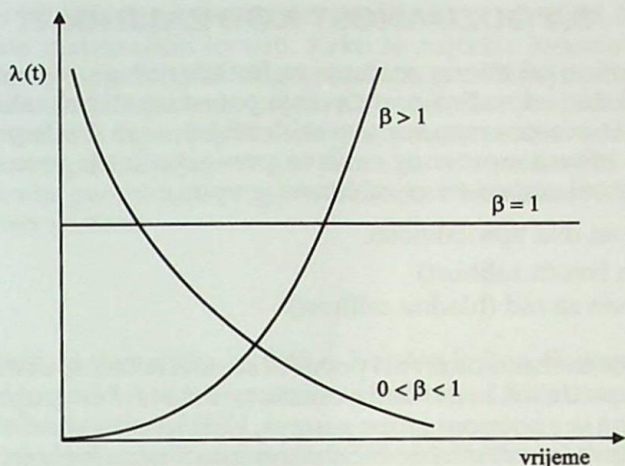
Pretpostavimo da funkcija indeksa kvara ima oblik:

$$\lambda(t) = (\alpha\beta)t^{\beta-1}$$

gdje su  $\alpha$  i  $\beta$  pozitivni parametri. Oblici funkcije indeksa kvara u ovisnosti o parametru  $\beta$  prikazani su na slici 6.

Izborom parametara  $\beta$  može se postići da funkcija gustoće kvarova bude rastuća ili padajuća, već prema tome kakva se konkretna situaciju želi matematički modelirati.

$$f(t) = (\alpha\beta)t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta}$$



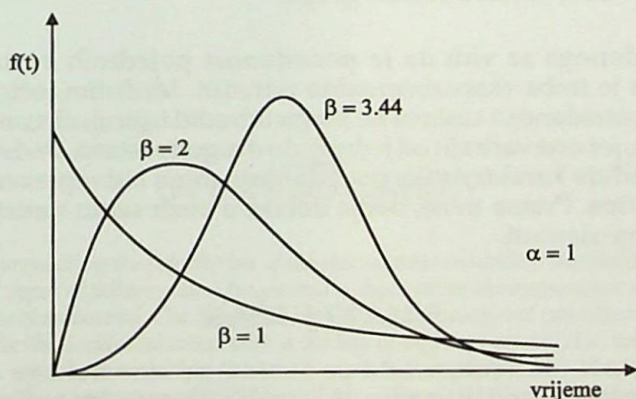
Slika 6. Indeks kvara u ovisnosti o  $\beta$

Izgled funkcije gustoće kvarova prikazan je na slici 7.

Funkcija pouzdanosti za Weibullovu razdiobu je:

$$R(t) = e^{-\alpha t^\beta}$$

Za  $\beta = 1$  Weibullova razdioba svodi se na eksponencijalnu razdiobu, dok je kod  $\beta = 3,44$  približno jednaka normalnoj razdiobi. Vjerojatnost kvarova koji nastaju pod utjecajem slučaja i istrošenosti, opisuju se Weibullovom razdiobom s parametrom  $\beta$  koji varira od 1 do 3,44.



Slika 7. Funkcija gustoće kvara u ovisnosti o  $\beta$

## 5. POUZDANOST KOD ZALIHOSTI

Kod sustava koji su od bitnog značenja za funkcioniranje, pouzdanost bi trebala biti čim veća. Jedan od načina povećavanja pouzdanosti jest zalihost. Zalihost se sastoji u tome da se osnovnom sustavu pridruži još jedan ili više pričuvnih sustava koji u slučaju otkaza osnovnog sustava preuzimaju njegovo funkcioniranje. Osnovni i pričuvni sustavi tvore zalihosnu grupu.

Moguća su dva tipa zalihosti:

- pogon (vruća zalihost)
- spreman za rad (hladna zalihost).

Kod vruće zalihosti osnovni i pričuvni sustavi nalazi se u istom režimu rada. Do otkaza grupe dolazi samo kada otkazu svi sustavi iz grupe. Pojam pogon zalihosti poklapa se s pojmom grupe sustava, kada su svi sustavi vezani paralelno. Pritom je dovoljno da radi samo jedan sustav za normalno funkcioniranje grupe.

Kod hladne zalihosti pričuvni sustavi nalaze se izvan funkcije i uključuju se u funkcioniranje jedan za drugim u slučaju kada otkaze prethodni sustav. Pretpostavlja se da je uključivanje trenutačno i apsolutno pouzdano.

Vjerojatnost otkaza grupe (nepouzdanost grupe) jednaka je umnošku vjerojatnosti pojave kvara na pojedinim sustavima unutar grupe. Pouzdanost grupe jednaka je:

$$R_G(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

gdje je:

$R_G(t)$  – pouzdanost grupe

$R(t)$  – pouzdanost pojedinog sustava unutar grupe

$n$  – broj sustava unutar grupe.

Iz navedenoga se vidi da je pouzdanost pojedinih sustava unaprijed nepoznata i da je treba eksperimentalno odrediti. Međutim, očigledno je da se karakteristike pouzdanosti sustava ne mogu odrediti ispitujući samo jedan sustav određenog tipa, jer one variraju od jednog do drugog sustava. Podskup sustava na kojemu se određuju karakteristike pouzdanosti, mora biti reprezentativan za sve sustave nekog tipa. Prema tome, ovdje dolaze u obzir samo statističke metode u određivanju pouzdanosti.

## 5. ZAKLJUČAK

Pouzdanost znači vjerojatnost da će sustav unutar nekoga promatranog vremenskog razdoblja raditi ispravno, tj. sa zadovoljavajućim performansama, što znači da pouzdanost predstavlja vjerojatnost da se u tom razdoblju neće pojaviti kvar. Kvarovi se dijele na vremenske i slučajne. Uzroci su vremenskih kvarova istrošenosti i zamor materijala. Učestalost pojave takvih vremenskih kvarova raste s dužinom vremena eksploatacije, što znači da pouzdanost opada. Slučajni kvarovi pojavljuju se tijekom čitavog razdoblja eksploatacije. Praćenjem i evidentiranjem

moгу se staviti u vremensku ovisnost i time statistički predvidjeti, što znači da se i pouzdanost može matematički izraziti. Kako se najčešće kvarovi kod brodskih sustava pojavljuju zbog jednog ili drugog razloga, potrebno je pomatrati složenu pouzdanost kao funkciju obiju vrsta kvarova. Pouzdanost brodskih sustava koji su važni za funkcionalnost, sigurnost ili ekologiju, povećava se uvođenjem zalihosti. Osnovnom sustavu pridodjeljuje se još jedan ili više pričuvnih sustava koji u trenutku otkazivanja preuzimaju njegovu funkciju. Pouzdanost takve grupe raste s brojem pričuvnih sustava.

## LITERATURA

- [1] Z. A. Ivković, Matematička statistika, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [2] A. Kelly, Harris M. J., Management of Industrial Maintenance, Newnes - Butterworths, London, 1978.
- [3] A. Kelly, Maintenance Planning and Control, Butterworths, London, 1984.
- [4] J. Lovrić, Osnove brodske terotehnologije, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1989.
- [5] J. Lovrić, Sposobnost održavanja brodskih sustava, IV simpozij Teorija i praksa brodogradnje, Opatija, 1980.
- [6] S. Shields, K. J. Sparshott, E. A. Cameron, Ship Maintenance: a quantitative approach, Marine Media Management Ltd, London, 1975.
- [7] M. R. Spiegel, Probability and Statistics, Schaum's outline series, McGraw-Hill company, Singapore, 1980.
- [8] M. Tudor, Računalni model održavanja broda, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1997., magistarski rad.
- [9] M. Tudor, Analiza pojave kvarova kod brodskih sustava, Pomorstvo, god. 15, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, str. 97.-103., Rijeka, 2001.
- [10] E. S. Ventcelj, Issledovanije operacij, Sovjetskoje, Radio, Moskva, 1972.

### Summary ON THE SHIP RELIABILITY

*The paper aims at presenting the calculation of the ship system reliability. Reliability is studied with regard to different types of failures, as it functionally depends on the appearance of a certain failure. Failures can be time of accidental. The time ones result from the worn-out condition of particular parts of the system, while the accidental ones, with a variety of different causes (i.e. unpredictable stress, error in handling, etc.), appear within the whole exploitation period. It is very often the case that systems fail due to the appearance of both the failures. Therefore, a special attention is paid to the complex reliability. By systems of utmost importance for the functioning, redundancy ensures a much greater reliability. Redundancy means that one or more reserve systems are joined to the main system, so that in case of the main system failure the reserve ones take over its functioning. The paper gives a review of how reliability is calculated by different types of redundancies.*

*Key words: reliability, ship system, failures*