

Mr.sc. Ante Bukša
Mr.sc. Mato Tudor
Mr.sc. Predrag Kralj
Pomorski fakultet u Rijeci
Rijeka, Studentska 2

Prethodno priopćenje
UDK: 629.5.03
681.5.09
629.5.083.4
Primljeno: 07. lipnja 2004.
Prihvaćeno: 30. lipnja 2004.

ANALIZA KVAROVA BRODSKIH REDUDANTNIH SUSTAVA

Poboljšanje pouzdanosti brodskog porivnog sustava, odnosno reduciranje stope kvara, postiže se analizom kvarova brodskih redundantnih sustava. Najveću stopu kvara ima porivni sustav. Najugroženija komponenta porivnog sustava (porivnog stroja) su ispušni ventil i VT pumpa s najvećom stopom kvara. Povećanje pouzdanosti može se postići podešavanjem postojećeg koncepta održavanja pomoću analize operativnih podataka brodskog pogona. Da bi brodski porivni sustav bio otporniji na kvarove, zbog nedostataka konvencionalnih porivnih sustava (jedan porivni stroj – jedan brodski vijak), potrebno je ugraditi više porivnih strojeva i kormila s potrebnom pomoćnom servisnom podrškom za svaki stroj, više sustava osovina i osiguravanje višestrukih prostora zbog opasnosti od požara ili poplave.

Ključne riječi: pouzdanost, redundantni sustavi, kvarovi, održavanje

1. UVOD

Povećanjem snage porivnog sustava postavljaju se sve veći zahtjevi u pogledu pouzdanosti. Havarija porivnih strojeva mogla bi prouzrokovati velike materijalne gubitke i ugroziti sigurnost ljudi. Stoga se povećanju pouzdanosti rada porivnog stroja posvećuje posebna pažnja. Analiza pouzdanosti podrazumijeva stalno analiziranje kvarova tehničkih sustava, kao i njihovih sastavnih elemenata.

U stručnoj literaturi postoji mnogo radova iz područja teorije pouzdanosti tehničkih sustava [1,2,3,4], gdje su razmatrani opći principi i zadaci pouzdanosti. Isto tako, objavljeno je niz analiza u kojima je razmatrana pouzdanost dizel-motora i njihovih elemenata [5,6,7,8,9,10,11,12,13].

Porivni sustav brodova, koji su dizajnirani i izgrađeni da bi zadovoljili klasifikacijskim pravilima i IMO propisima, posjeduje prihvatljivu razinu pouzdanosti za sigurnu operaciju brodova. Redudanca je pomogla, da bi se osigurala konstantna operacija broda, gdje je iskustvo pokazalo da pouzdanost jedne komponente nije zadovoljavajuća. Međutim, zbog neočekivanih kvarova na porivnom sustavu, brodovi su nesposobni za operaciju određeni vremenski period. Ako se gubitak poriva čak i za kratko vrijeme ne smije tolerirati, brodovlasnici koriste rigorozniji redundantni dizajn da bi smanjili rizik.

2. BRODSKI REDUDANTNI SUSTAVI

U redudancu (redundancy – zalihost) spadaju konfiguracije koje sustavu osiguravaju sposobnost da izbjegne zastoje i onda kada neka od njezinih komponenti iznevjeri [14], odnosno, to su konfiguracije s dupliranjem komponenti mehaničke ili elektroničke opreme, tako da se operacija može nastaviti i nakon kvara komponente [11].

Posljednjih godina objavljeno je niz radova iz ovog područja, gdje se opisuju aspekti redudance pogonskih sustava na brodovima [9,15,16]. Postavljaju se pitanja:

1. Gdje i kada je redudanca potrebna?
2. Koji način redudance je potreban?
3. Koliko redudance je potrebno?

Očito je da je cilj redudance povećati pouzdanost. Također je razvidno da će redudanca povećati složenost instalacije, a time će u mnogim slučajevima povećati važnost ljudskih aktivnosti. Treba napomenuti da tehnički kvarovi nisu jedini uzroci za nesreću na brodovima. To može biti operativna greška, vremenski utjecaji, nasukavanje ili promet (sudar s drugim brodom) [11].

Razmatranje u pogledu poboljšanja pouzdanosti ili reduciranje stope kvara mora početi s opisom sadašnje situacije. U [15] prikazani su rezultati istraživanja zastoja pogona na rijeci Elbi između Brunsbüttel i Hamburga u Kiel kanalu, u vremenu od 1993. – 1994.g. Od ukupno 259 kvarova 92 (≈36%) kvara bilo je na glavnom stroju, 65 (≈25%) na kormilarskom uređaju, 33 (≈13%) na dovodu goriva, 15 (≈6%) na sustavu hlađenja vodom, 12 (≈5%) na pneumatskom/hidrauličkom sustavu, 9 (≈4%) na sustavu podmazivanja, 6 (≈2%) zbog vode u gorivu i 27 (≈10%) ostalo (električni sustavi i sl.). Iz ovog proizlazi da je (75%) kvarova bilo na porivnom sustavu.

Stopa kvara brodskog pogona prikazana je u tablici 1. Ukupna stopa kvara je 3 događaja na 10000 operativnih sati za jedan brod.

Komponenta (sustav)	Stopa kvara sat ⁻¹
Voda u gorivu	6,82·10 ⁻⁶
Sustav podmazivanja	10,20·10 ⁻⁶
Pneumatski / hidraulički sustavi	13,60·10 ⁻⁶
Ostalo	14,80·10 ⁻⁶
Električni sustavi	15,90·10 ⁻⁶
Sustav hlađenja vodom	17,10·10 ⁻⁶
Sustav dovoda goriva	37,50·10 ⁻⁶
Kormilarski uređaj	73,90·10 ⁻⁶
Porivni stroj	105,00·10 ⁻⁶
Ukupna stopa kvara	295·10 ⁻⁶

Tablica 1. Stopa kvara brodskog pogona

Prema podacima iz tablice 1 glavni činilac u ukupnoj stopi kvara je porivni stroj s jednim događajem po brodu i 10000 operativnih sati, zatim slijedi kormilarski uređaj s 0,7 događaja. Nije bilo informacija o starosti broda i stroja, vrsti stroja (4-taktni ili 2-taktni), stanje održavanja stroja i vještini i obrazovanju posade.

Sva poboljšanja odnose se na ukupnu stopu kvara. Pomoću aktivno redundantnih porivnih strojeva stopa kvara može se reducirati za ≈36%. Samo redundantni kormilarski uređaj daje poboljšanje od ≈25% itd. Prema tome, poboljšanja se mogu dobiti redundantnim sustavom podmazivanja, pneumatski/hidrauličkim sustavima, sustavom hlađenja vodom, sustavom dovoda goriva i kormilarskim uređajem, kao redundantnim porivnim strojem. Aspekti redundantnog sustava opisani su u [8].

U radu [9] istraživanje pouzdanosti bazirano je na (89) dizel-električnim elektranama s ukupno (422) stroja. Najviše kvarova zabilježeno je na opremi ubrizgavanja goriva (fuel injection equipment) (22%), kontrolnom sistemu (control system) (12%) i ispušnom sistemu (exhaust system) (9%). Greške u sustavu punjenja zraka (charge air system) bile su na jedanaestom mjestu liste kvarova i iznosile su (4%).

Da bi se istražila pouzdanost brodskog porivnog sustava u Japanu je oformljen tzv. "Ship Reliability Investigation Committee" (SRIC), koji je izradio studiju pouzdanosti sustava propulzije na (231) brodu različitih namjena u trinaest godišnjem periodu (od 1982. do 1995. god) [16] (Tablica 2 i 3).

Oprema	Slučajevi	Prosječno radnih sati za popravak
Porivni stroj	6336 (9,1%)	10,3
Generator pare	6168 (9,2%)	5,2
Generator stroja	4608 (6,8%)	6,1
Kontrolna oprema	14204 (20,7%)	4,1
Električna oprema	3291 (5,2%)	2,2
Oprema osovine (vratila)	385 (0,6%)	2,1
Pomoćni strojevi	31923 (46,5%)	5,4
Navigacijska i komunikacijska oprema	1345 (1,9%)	3,6

Tablica 2. Prikaz stanja

	Komponente	Stopa kvara na 1000 sati
Oprema osovine	Brodski vijak	0,00331
	Osovina	0,00047
	Ležajevi	0,00142
	Krmena cijev	0,00177
	Brtva krmene cijevi	0,02693
Porivni stroj	Komponente povezane s komorom izgaranja	
	VT pumpa, cijevi, ispušni ventili, itd.	0,4218
	Oprema za prijenos okretnog momenta	0,0428
	Kućište i unutarnje komponente	0,0428
	Ostalo	0,4818

Tablica 3. Stope kvara komponenata porivnog sustava

Ovo pokazuje vrlo interesantnu tendenciju da se gotovo pola slučajeva pripisuje kvarovima pomoćnih brodskih uređaja i pomoćnih motora, a oprema osovina relativno je pouzdana (Tablica 2).

U tablici 3 prikazano je izvješće Komisije za istraživanje brodske pouzdanosti - SRIC o opremi osovine i porivnog stroja. Stopa kvara opreme osovine (vratila) i dizel-stroja razlikuje se faktorom 10^2 . Najveća stopa kvara je za ispušni ventil, VT pumpu i cijevi $\lambda = 0,4218 \cdot 10^{-3} \text{ [sat}^{-1}\text{]}$. Identificirane komponente, kao dio sustava stroja, su najintenzivnije održavane komponente na brodovima (nedostaje rasprskič). Ukupna stopa kvara porivnog stroja prema tablici $\lambda = 0,989 \cdot 10^{-3} \text{ [sat}^{-1}\text{]}$. Pouzdanost porivnog

stroja $R(1000) = e^{-\lambda t} = e^{-0,989 \cdot 10^{-3} \cdot 1000} = 0,37$.

U [17] pokazani su različiti oblici funkcije pouzdanosti $R(t)$ (Weibull RF) s parametrom položaja $t_0 = 0$ i različitim vrijednostima η i β . Sve krivulje presijecaju se u karakterističnoj točki (1; 0,368). Odgovarajuća pouzdanost tada iznosi (36,8%) ($R(t) \approx 0,37$ - postignuta vrijednost SRIC-a). Ako se radi o neispravnosti funkcija kumulativne raspodjele $F(t) = 0,63$ (63%). Sve krivulje funkcije kumulativne raspodjele $F(t)$ (Weibull CDF) sijeku se u karakterističnoj točki (1; 0,632) gdje je $t = \eta$. Kod Weibullovog zakona razina pouzdanosti ispitivanih komponenata ili sustava svodi se na određivanje parametra oblika β i omjera η . Parametar omjera η predstavlja karakterističan vijek (vrijeme održavanja) i daje osnovu za ocjenjivanje ostvarenog vijeka, dok parametar oblika β određuje oblik PDF, CDF, RF i HF.

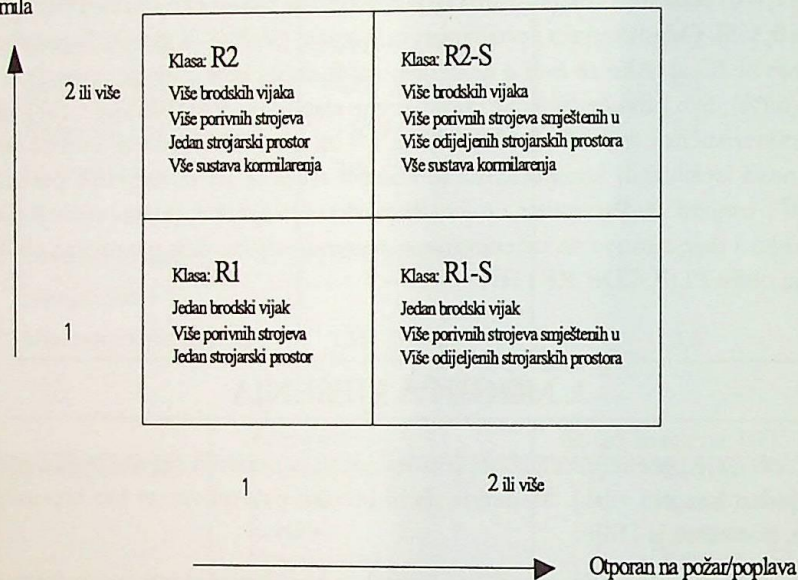
3. MOGUĆA RJEŠENJA

Uočena je potencijalna slabost konvencionalnih porivnih sustava (jedan porivni stroj – jedan brodski vijak). Međutim, da bi brodski porivni sustav bio otporniji na kvarove, potrebno je [16]:

- Dupliranje porivnog stroja i kormila s potrebnom pomoćnom servisnom podrškom za svaki stroj.
- Dupliranje sustava osovine što će popraviti ukupnu pouzdanost, iako sustav s jednom osovinom također pokazuje visoku razinu pouzdanosti.
- Osiguranje višestrukih prostora zbog opasnosti od požara ili poplave.

Očito je da će eliminacija potencijalnog zajedničkog uzroka kvara pomoću redundance sigurno popraviti pouzdanost sustava. Primijećeno je da su komponente osovine pouzdanije u usporedbi s nekom drugom komponentom u porivnom sustavu. Drugim riječima, osjetljivost na poboljšanje raspoloživosti dupliranjem sustava osovine, je prilično niska u relativnim uvjetima. Može se zaključiti da će eliminiranje svih potencijalnih zajedničkih uzroka, izuzev osovine, također dati visoku razinu pouzdanosti sustava.

Otporan na kvarove
 porivnog stroja i
 kormila

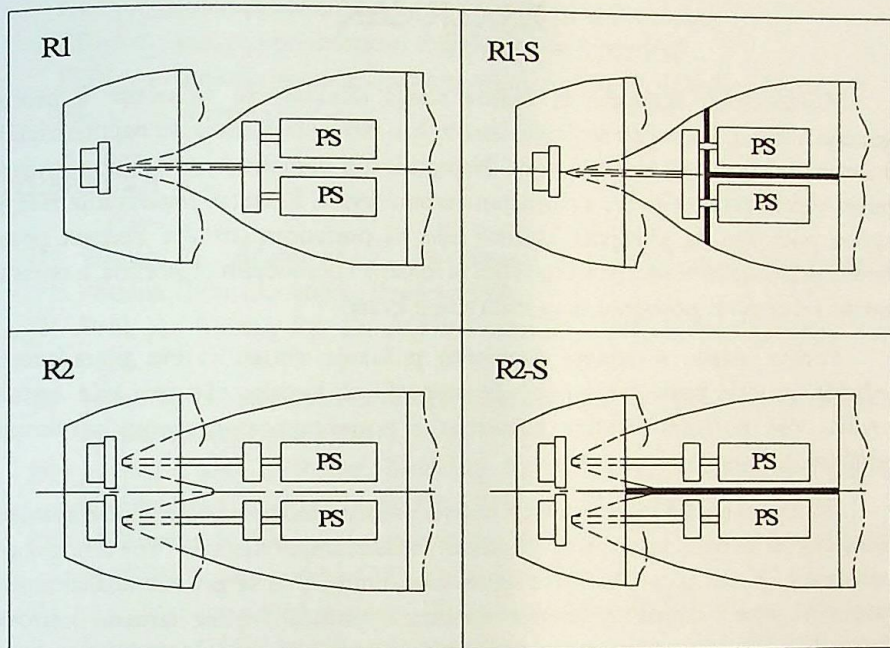


Slika 1. Razina redudance [16]

Prema slici 1 SRIC predlaže četiri različite razine redudance, a određena su brojem sustava osovina i brojem strojarških prostora, ovisno o tipu operacije i razini rizika. Za sva rješenja traži se više od jednog porivnog stroja. Rješenje R1 može imati jednu osovinu i jedan sustav kormilarenja (više porivnih strojeva s jednom osovinom preko reduktora). Rješenje R2 sadržava više od jedne osovine i više sustava za kormilarenje (više porivnih strojeva s više osovina). Da bi se napravio porivni sustav otporan na požar ili poplavu, rješenja pod R1-S i R2-S predlažu više strojarških prostora. Na slici 2 prikazane su varijante navedenih redudantnih rješenja. Potrebno je da porivni sustav bude dizajniran tako da ni jedna greška koja se javi u sustavu neće ugroziti operaciju broda. Da bi se zadržala visoka pouzdanost sustava, na mjestima gdje nije moguća redudanca, moraju se koristiti komponente visoke pouzdanosti.

Uključeni su zahtjevi za odvojene višestruke tankove sustava goriva. Dovod i odvod za svaki FO spremnik mora biti neovisan jedan od drugog. Ako postoji veza između dva sustava, oni moraju biti raspoređeni tako da jedan kvar u jednom sustavu cijevi neće oštetiti drugom sustavu cijevi.

Za rješenja s više strojarških prostora (R1-S i R2-S) pomoćni sustavi (sustav goriva, sustav podmazivanja, sustav rashladne vode, hidraulički sustav itd.) moraju biti neovisni jedan od drugog.



Slika 2. Porivni sustavi i moguća redundantna rješenja

Povećanje pouzdanost brodskih redundantnih sustava, osim gore spomenutih rješenja, postiže se podešavanjem ili prilagodavanjem koncepta održavanja, na osnovi eksploatacijskih podataka brodskog pogona. Podaci se koriste da se poboljša sadržaj zadataka i interval održavanja. Povremeno podešavanje inicijalnog koncepta održavanja u realnoj situaciji (eksploataciji) doprinosi povećanju pouzdanosti i minimizaciji LCC-a. Da bi se pristupilo podešavanju koncepta održavanja, slijedi ovaj postupak: program održavanja \Rightarrow operacija \Rightarrow sakupljanje podataka (dnevnicima stroja) \Rightarrow povijesni zapisi održavanja \Rightarrow baza podataka modova kvara (analiza tipova komponenti i modova kvara (FMCC)) \Rightarrow analiza rizika \Rightarrow podešavanje koncepta održavanja.

Glavni stroj je funkcionalno najznačajnija komponenta i njezina stopa upotrebe među svim strojevima na brodu je najviša. Troškovi održavanja glavnog stroja su $\approx 24\%$ od svih troškova održavanja sustava broda [18]. Podešavanjem koncepta održavanja moguće je reducirati (optimizirati) spomenute troškove.

4. ZAKLJUČAK

Komponente dobivene iz analize stanja direktno su uključene u proces izgaranja u stroju. Identificirane komponente, kao dio sustava stroja, su najintenzivnije održavane komponente na brodovima. Najugroženija komponenta porivnog stroja je ispušni ventil i pumpa goriva s najvećom stopom kvara. Rezultati istraživanja zastoja pogona pokazuju da je najviše kvarova bilo na porivnom sustava. Pedeset posto kvarova pripisuje se pomoćnim brodskim uređajima i pomoćnim motorima, a oprema osovina relativno je pouzdana (ima malu stopu kvara).

Porivni sustav s jednom osovinom pokazuje visoku razinu pouzdanosti. Međutim, brodski porivni sustav bit će otporniji na kvarove ako ima više sustava osovina, više porivnih strojeva i kormila s potrebnom pomoćnom servisnom podrškom za svaki stroj.

Povećanje pouzdanosti brodskih porivnih sustava može se postići podešavanjem postojećeg koncepta održavanja brodskih redundantnih sustava. To omogućava smanjenje LCC, uz zadovoljavajuće sigurnosne limite. Ovo se postiže analiziranjem kvarova pogona i načina održavanja. Analiza obuhvaća vrijeme između kvarova, vrijeme do održavanja, razinu smanjenja radnih karakteristika i izvedene karakteristike (pouzdanost, pristupačnost, mogućnost održavanja).

Najpouzdanija podloga za planiranje i podešavanje koncepta održavanja je snimanje stanja vlastite opreme za vrijeme eksploatacije, kako bi se evidentiranjem ciklusa kvarova, njihovih uzročnika i uvjeta u kojima su se dogodili, moglo prikladnom obradom podataka najrealnije odrediti buduće planirane zahvate održavanja, kao i vrste i količine rezervnih dijelova.

Oznake

- $F(t)$ - funkcija kumulativne raspodjele (CDF)
- $R(t)$ - funkcija pouzdanosti (RF)
- t - vrijeme
- t_0 - položaj, pomak ili parametar ulaza (Threshold Parameter)
- β - parametar oblika (shape Parameter)
- η - parametar omjera (Scale Parameter)
- CDF - funkcija kumulativne raspodjele $F(t)$ (Cumulative Distribution Function)
- CHF - kumulativna funkcija inteziteta kvarova $H(t)$ (Cumulative Hazard Function)
- FMCC - kombinacija mod kvara / uzrok (Failure Mode/Cause Combination)
- LCC - troškovi životnog ciklusa (Life Cycle Costs)

HF	- funkcija inteziteta kvarova $h(t)$ (Hazard Function)
RF	- funkcija pouzdanosti $R(t)$ (Reliability Function)
PDF	- funkcija gustoće vjerojatnosti $f(t)$ (Probability Density Function)
PS	- porivni stroj

LITERATURA

- [1] Tomić, M., Adamović, Ž., Pouzdanost u funkciji održavanja tehničkih sistema, Tehnička knjiga, Beograd 1986
- [2] Paul, A., Tobias, Ph. D., Applied reliability, VNR Company, New York, 1986.
- [3] Ivanović, G., Stanivuković, D., Pouzdanost - analiza i projekovanje, Tehnička uprava SSNO, Split, 1988.
- [4] J. Pukite and P. Pukite, Modeling for Reliability Analysis, Institute of Electronics Engineers, New York, 1998.
- [5] H. Blaeser, K. Weertz, Improving the Reliability of diesel engines, Shipping H World & Shpibuilder 1375, December 1972.
- [6] Medium speed engines - Maintenance for reliability, Marine Propulsion Internat., (1989) July/August, str. 18.
- [7] Blaeser, K. Weertz, Improving the reliability of diesel engines, Shipping H World & Shipbuilder, 165 (1972) 3870, str. 1375 - 1377.
- [8] Frederic P., Reliability - the proven, cost - effective way, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [9] K. R. Winn, Turbo charging: Redundancy versus reability, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [10] Rajner, V., Methods to improve the reliability of engines, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [11] F. Porchet, Reliability - the proven, cost - effective way, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [12] O. Motomura, Reliability aspects and benefits in low aped marine diesel engines, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [13] Tomašević M., Oršulić M. i Belak S., Istraživanje pouzdanosti brodskog dizelskog motora, Naše more, 47 (3 - 4)/2000.
- [14] Lovrić, J., Osnove brodske terotehnologije, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet Dubrovnik, 1989.

- [15] Dr. R. Krapp, Why is increased redundancy needed, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21 - 22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [16] Yoshi Ozaki, An introduction to the ABS Guide for Propulsion Redundancy, Guide for Propulsion Redundancy, The Motor Ship, June 1997.
- [17] Chi - Chao Liu, A Comparison Between the Weibull and Lognormal Used to Analyze Reliability Data, Department of Manufacturing engineering and Operations, University of Nottingham, 1997.
- [18] Vučinić, B., MA - CAD, Maintenance Concept Adjustment and Design, Delft University of Technology, Delft, 1994.

Summary

FAILURE ANALYSIS OF SHIP'S REDUNDANCY SYSTEMS

Reliability improvement of a ship's propulsion system is achieved by reducing the failure rate of the ship's redundancy system. The propulsion system has the highest failure rate in the ship's redundant system. The propulsion system has the highest failure rate in the ship's machinery. The exhaust valve and injection pump are the most endangered items with the highest failure rates. Reliability enhancement can be achieved by adjustment of the existing concept of maintenance by means of an analysis of the operational data of the ship's propulsion system. In order to make the ship propulsion system more resistant to failures, in light of the faults in the conventional propulsion system (one propulsion engine – one propeller shaft), it is necessary to install redundant propulsion engines and steering wheels with necessary auxiliary service support for each engine, with a multiple system of shafts and provide multiple spaces for fire or flood risks.

Key words: reliability, redundant systems, failures, maintenance

*Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2, 51000 Rijeka
Croatia*