

Dr. sc. Ante Bukša
Dr. sc. Ivica Šegulja
Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2
51000 Rijeka

Izvorni znanstveni rad
UDK: 621.436
629.5.083.42
Primljeno: 29. listopada 2008
Prihvaćeno: 10. studenoga 2008

POUZDANOST BRODSKIH SUSTAVA

Pri analizi pouzdanosti složenih brodskih sustava neophodno je odrediti pouzdanost komponenata podsustava, kao i pouzdanost cijelog sustava. Sustav goriva dizelskog motora prikazan je kao složeni tehnički sustav koji se sastoji od pasivno paralelnih i djelomično paralelnih podsustava vezanih u seriju. Analizirana je pouzdanost sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar, kao i pouzdanost sustava goriva dizelskog motora u cjelini. Veća pouzdanost sustava goriva dizelskog motora dobije se ako je manja stopa kvara, i veći broj paralelno vezanih komponenata redundantnih podsustava. Dokazano je da je pouzdanost sustava goriva dizelskog motora u cjelini veća od pouzdanosti sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar. Predlaže se da povećanje pouzdanosti brodskih sustava mora ići u smjeru izbora kvalitetetnije komponente (manje stope kvara) i boljeg održavanja.

***Ključne riječi:** pouzdanost, brodski sustavi, sustav goriva, redundantni sustavi*

1. UVOD

Brodski sustavi su složeni tehnički sustavi kojima tijekom eksploatacije niz čimbenika ugrožava pouzdani i dugotrajni rad. Jedan od tih čimbenika su visoki tlakovi i temperature. Pod pouzdanošću dizelskih motora podrazumijeva se vjerojatnost ispunjavanja njegovih projektiranih funkcija u određenim uvjetima eksploatacije.

Povećanjem snage porivnog sustava postavlja se sve veći zahtjevi u pogledu pouzdanosti. Rezultati istraživanja zastoja brodskog pogona pokazuju da je najviše kvarova bilo na porivnom stroju [1-5].

Da bi se istražila pouzdanost brodskog porivnog sustava oformljen je u Japanu tzv. Ship Reliability Investigation Committee koji je izradio studiju pouzdanosti porivnih sustava na 231 brodu različitih namjena u trinaestogodišnjem periodu [3]. Najveća stopa kvara na porivnom stroju bila je 0,4218 na 1000 sati

(HP pumpa, cijevi, ispušni ventil itd.). Ukupna stopa kvara porivnog stroja $\lambda = 0,989 \cdot 10^{-3} [\text{sat}^{-1}]$, a tada je pouzdanost $R(1000) = e^{-\lambda t} = e^{-0,989 \cdot 10^{-3} \cdot 1000} = 0,37$.

2. TEORIJSKE OSNOVE

Uobičajena situacija je da za proizvedene komponente stoje na raspolaganju statistički, a često i cenzurirani podaci o životnom vijeku. Komponente, kao dio opreme ili sustava, mogu biti u operaciji pod različitim uvjetima (katkada ekstremnim). Sposobnost sustava da pravilno funkcionira ovisi o sposobnosti pojedinih komponenti da opstanu u radu, ili drugim riječima, o njihovoj pouzdanosti.

U stručnoj literaturi postoji niz radova iz područja teorije pouzdanosti tehničkih sustava, gdje su razmatrani opći principi i zadaci pouzdanosti [6-10]. Isto tako, objavljeno je također niz radova u kojima je razmatrana pouzdanost dieselskih motora i njihovih elemenata [11-15].

Može se istražiti pouzdanost složene naprave koja se sastoji od više komponenta poznate pouzdanosti, što je prikazano na slici 1. Pouzdanost sustava jednaka je

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_i^n R_i(t), \quad (1)$$

gdje je R_s pouzdanost sustava, a R_i pouzdanost i -te komponente sustava ($i = 1, 2, 3 \dots n$). Ako se pretpostavi da su pouzdanosti pojedinih elemenata međusobno jednake $R_i(t) = R(t)$, dobije se

$$R_s(t) = R(t)^n. \quad (2)$$



Slika 1. Serijski sustav

Takav sustav se prikazuje serijskom vezom jer ispad jedne komponente prouzroči ispad cijelog sustava.

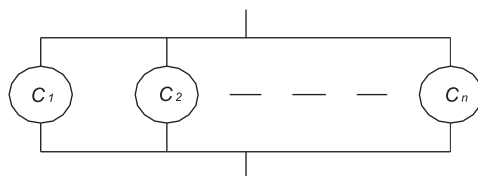
Pouzdanost sustava se može povećati ako se poveća pouzdanost pojedine komponente. To se postiže ugradnjom redundantnih komponenti kao što je prikazano na slici 2. Tada se dobije takav sustav kod koga do kvara dolazi samo u

slučaju kada se kvarovi jave u svim paralelno vezanim komponentama. Pouzdanost sustava jednaka je

$$R_s(t) = 1 - (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_n(t)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (3)$$

Ako pretpostavimo da sustav ima n paralelno vezanih komponentata i da su pouzdanosti svih paralelno vezanih komponentata međusobno jednake, odnosno $R_i(t) = R(t)$, dobije se:

$$R_s(t) = 1 - (1 - R(t))^n \quad (4)$$



Slika 2. Paralelni sustav

Pouzdanost sustava s paralelno vezanim komponentama uvijek je veća od pouzdanosti najpouzdanije komponente, dok je kod sustava sa serijski vezanim elementima i ako se radi o komponentama relativno visoke pouzdanosti dobijemo sustav koji ima nisku pouzdanost. Pretpostavimo dva sustava s dvije komponente pouzdanosti $R(t) = 0,9$, gdje prvi ima paralelnu vezu, a drugi serijsku. Ukupna pouzdanost paralelnog sustava $R_s(t) = 0,99$, dok je kod serijskog sustava $R_s(t) = 0,81$. Za deset komponenti u paralelnom sustavu $R_s(t) = 0,9999999999$, dok je za deset komponenti u serijskom sustavu $R_s(t) = 0,348678$. Pouzdanost za sto komponenti u paralelnom sustavu $R_s(t) = 0,9_{100}$ (iza decimalnog zareza broj ima sto devetki), a pouzdanost u serijskom spoju $R_s(t) = 0,000027$. Razlika je očita. Ovo ide u korist redundantnih sustava. Redundanca (Redundancy – zalihost) predstavlja konfiguraciju koja sustavu osigurava sposobnost da izbjegne zastoje u slučaju kada neka od komponentata iznevjeri [16], odnosno, to su konfiguracije s dupliranjem komponenti mehaničke ili elektroničke opreme, tako da se operacija može nastaviti i nakon kvara komponente [13].

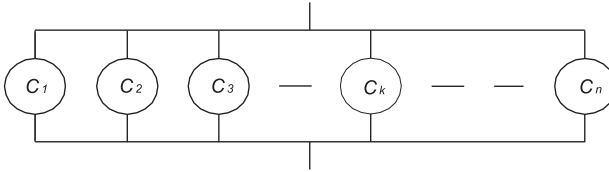
Dakle, sustav s redundancom može biti sustav s paralelnom, djelomično paralelnom vezom komponentata i pasivnom paralelnom vezom komponentata.

Za razliku od paralelne veze komponentata kod koga je sustav ispravan pod uvjetom da je jedna od n komponentata ispravna, kod djelomično paralelnih veza komponentata kod kojih je sustav ispravan pod uvjetom da bude k isprav-

nih komponenti u n komponentata sustava (Slika 3.). Funkcija pouzdanosti za ovaj sustav može se dobiti preko binomne raspodjele u obliku:

$$R_s(t) = \sum_{x=k}^{x=n} \binom{n}{x} R_i(t)^x [1 - R_i(t)]^{n-x} = \sum_{x=k}^{x=n} \frac{n!}{x!(n-x)!} R_i(t)^x [1 - R_i(t)]^{n-x}, \quad (5)$$

gdje je x minimalni broj komponentata sustava koji moraju biti u ispravnom stanju, a n ukupan broj komponentata u sustavu.

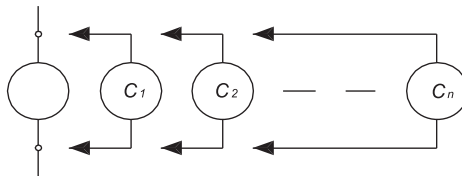


Slika 3. Sustav s djelomično paralelnom vezom komponentata

Funkcija pouzdanosti sustava za pasivno paralelnu vezu komponentata (Slika 4.) može se odrediti pomoću Poissonove raspodjele prema izrazu:

$$R_s(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right) e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

gdje je $k = 0 \div n$ promjenljiva (pričuvna) komponenta, λ stopa kvara (hazardna stopa) i t vrijeme.

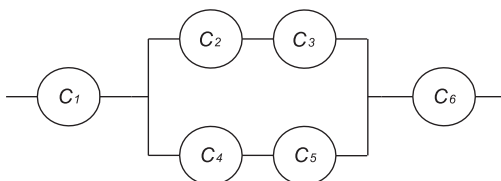


Slika 4. Sustav s pasivno paralelnom vezom komponentata

Sustavi s paralelnom vezom komponentata (vruća zalihost) su pogoni gdje do kvara sustava dolazi samo onda kada otkazu sve komponente iz grupe, dok se pod pasivnom paralelnom vezom (hladna zalihost) pričuvne komponente nalaze izvan funkcije i uključuju se kada otkaze vruća komponenta.

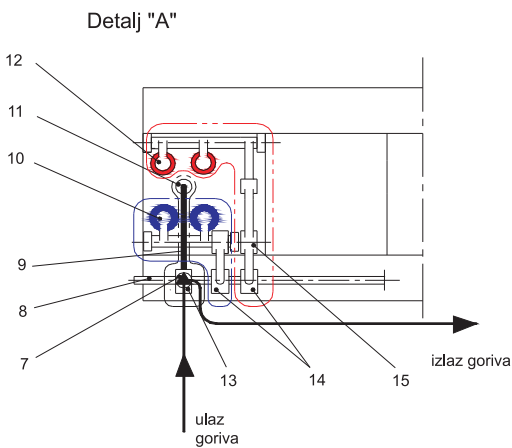
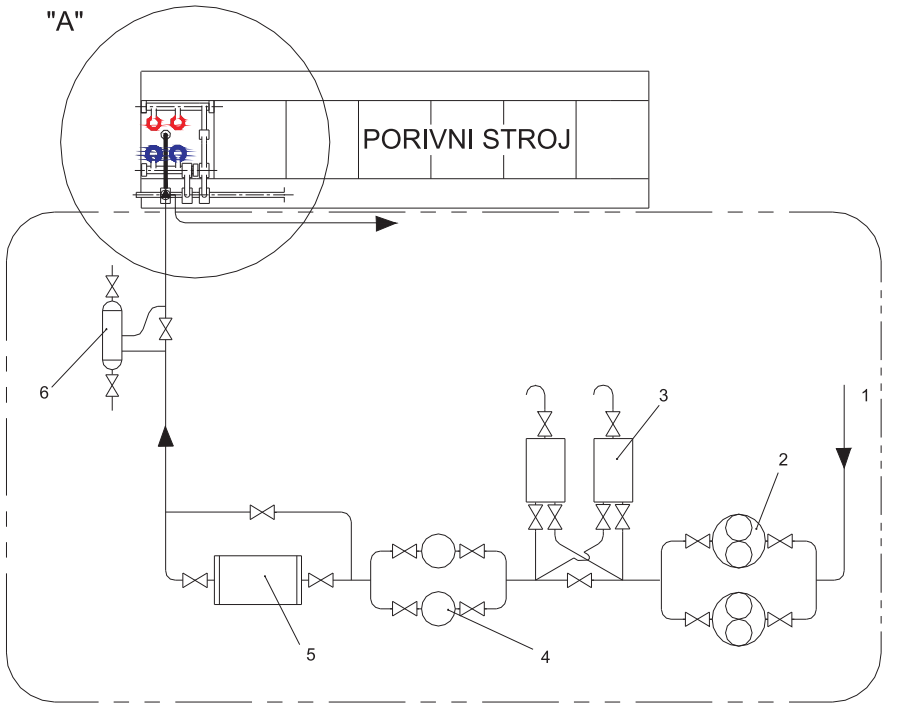
Serijski i paralelno vezane komponente predstavljaju strukturu složenog sustava (Slika 5.). Funkcija pouzdanosti može se lako odrediti uz pomoć ranije danih izraza, a prikazana je formulom:

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot [1 - (1 - R_2(t) \cdot R_3(t)) \cdot (1 - R_4(t) \cdot R_5(t))] \cdot R_6(t). \quad (7)$$



Slika 5. Složeni sustav

3. POUZDANOST BRODSKIH SUSTAVA



1. dovod goriva
2. transfer pumpa goriva
3. predgrijači
4. filtri
5. viskozimetar
6. hidraulički amortizer
7. pumpa goriva
8. bregasto vratilo
9. visokotlačna cijev
10. usisni ventil
11. rasprskač
12. ispušni ventil
13. brjegov pumpa za gorivo
14. brjegovi usisnog i ispušnog ventila
15. klackalica

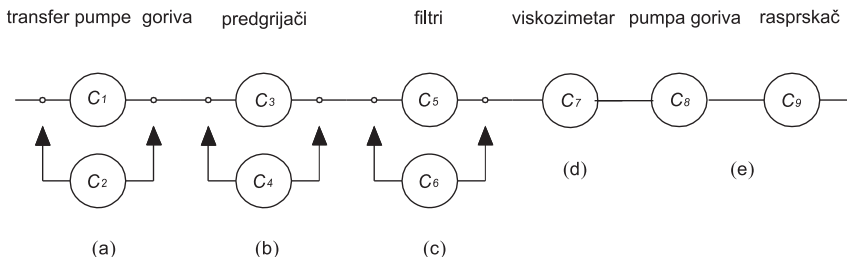
Slika 6. Shema konfiguracije porivnog stroja

Da bi se dobila pouzdanost složenih brodskih sustava potrebno je brodske sustave razdijeliti na manje složene dijelove i elemente (podsustave, komponente), odrediti pouzdanost njegovih komponenata podsustava, kao i pouzdanost sustava kao cjeline.

Analizom kvarova porivnog stroja, koji su nastali tokom dvije godine, primjenom RCM metode (Reliability Centered Maintenance) ustanovljeno je da je sustav goriva dominantni uzrok pojavi kvarova [17]. Od ukupnog broja kvarova izdvojeno je gornjih 20% koji doprinose riziku od 80% (80-20 princip).

Budući je sustav goriva dominantni uzrok pojave kvarova za istraživanje pouzdanosti odabran je sustav goriva srednjookretnog dizelskog motora MAN 7L 400/500 snage $\cong 2200$ kW (3000 KS) [18]. Shema sustava goriva dizelskog motora prikazana je na slici 6. Pod redundantne podsustave spadaju filtri, predgrijači i transfer pumpe goriva. Prema slici, primjenom teorijskih osnova može se dobiti pouzdanost sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar, kao i ukupna pouzdanost sustava goriva dizelskog motora.

3.1. Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar



Slika 7. Shema sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar

Shema sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar prikazana je na slici 6. Redundantni podsustavi s pasivno paralelno vezom komponenata pod (a), (b) i (c) mogu se izračunati prema izrazu (5). Komponente C_2 , C_4 i C_6 su pričuvne komponente, a uključuju se kada otkáže vruća komponenta (C_p , C_3 ili C_5). Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar jednaka je:

$$R_s(t) = R_a(t) \cdot R_b(t) \cdot R_c(t) \cdot R_d(t) \cdot R_e(t). \quad (8)$$

Pouzdanost podsustava:

$$R_a(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda_{ip}t)^k}{k!} e^{-\lambda_{ip}t} = e^{-\lambda_{ip}t} (1 + \lambda_{ip}t)$$

$$R_b(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda_p t)^k}{k!} e^{-\lambda_p t} = e^{-\lambda_p t} (1 + \lambda_p t)$$

$$R_c(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda_f t)^k}{k!} e^{-\lambda_f t} = e^{-\lambda_f t} (1 + \lambda_f t)$$

$$R_d(t) = R_r(t) = e^{-\lambda_r t}$$

$$R_e(t) = R_8(t) \times R_9(t) = e^{-\lambda_{vp}t} \times e^{-\lambda_r t}$$

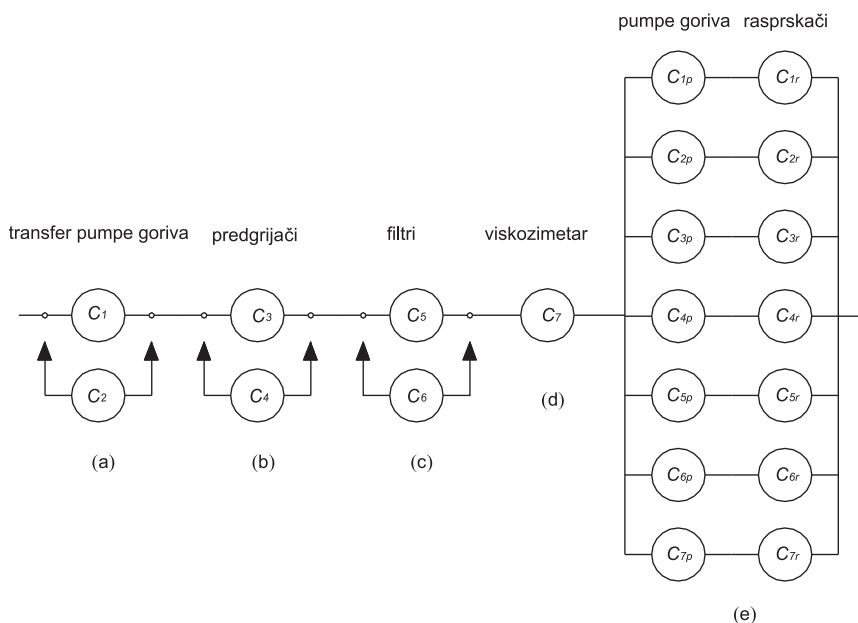
Uvrštavanjem dobivenih izraza u jednadžbu (8) dobije se izraz za pouzdanost sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar.

$$R_s(t) = (1 + \lambda_{ip}t)(1 + \lambda_p t)(1 + \lambda_f t) \cdot e^{-(\lambda_{ip} + \lambda_p + \lambda_f + \lambda_v + \lambda_{vp} + \lambda_r)t} \quad (9)$$

Gdje je λ_{ip} stopa kvara transfer pumpe goriva, λ_p predgrijača, λ_f filtra, λ_v viskozimetra, λ_{vp} visokotlačne pumpe goriva i λ_r rasprskavača.

Iz izraza proizlazi da pouzdanost sustava goriva za jedan cilindar ovisi o stopi kvara λ i vremena t . Veća pouzdanost sustava dobije se ako je veći broj pričuvnih komponenata redundantnih podsustava pod (a), (b) i (c) i manja stopa kvara u određenom vremenskom razdoblju.

3.2. Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora



Slika 8. Shema sustava goriva dizelskog motora

Sustav goriva dizelskog motora je složeni sustav koji se sastoji od podsustava s pasivno paralelnom vezom komponentata ((a), (b) i (c)) i podsustava s djelomičnom paralelnom vezom komponentata (e) vezanih u seriju s podsustavom (d) (Slika 8). Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora jednaka je:

$$R_s(t) = R_a(t) \cdot R_b(t) \cdot R_c(t) \cdot R_d(t) \cdot R_e(t). \quad (10)$$

Funkcija pouzdanosti podsustava pod (a), (b), (c) i (d) je ista kao i u prethodnom slučaju. Pouzdanost podsustava (e) dobije se iz izraza (5) za djelomično paralelnu vezu komponentata. Sedmocilindrični dizelski motor MAN 7L 400/500 može se smatrati da je ispravan ako mu ispravno radi bar šest cilindara:

$$R_e(t) = (e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^n + n \cdot (e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^x \cdot (1 - e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^{n-x}, \quad (11)$$

gdje je ukupan broj paralelno povezanih cilindara $n = 7$, a ukupan broj ispravnih cilindara $x = 6$.

Dakle, pouzdanost sustava goriva dizelskog motora je:

$$R_s(t) = (1 + \lambda_{vp}t)(1 + \lambda_p t)(1 + \lambda_f t) \cdot e^{-(\lambda_{vp} + \lambda_p + \lambda_f + \lambda_v + \lambda_{vp} + \lambda_r)t} \cdot \left[(e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^n + n \cdot (e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^x \cdot (1 - e^{-\lambda_{vp}t} \cdot e^{-\lambda_r t})^{n-x} \right] \quad (12)$$

Iz gornjeg izraza proizlazi da pouzdanost sustava goriva dizelskog motora također ovisi o stopi kvara λ i vremena t . Veća je pouzdanost ako je manja stopa kvara, veći broj pričuvnih komponenti redundantnih podsustava (a), (b) i (c), kao i veći broj paralelno povezanih komponenti u podsustavu (e) u određenom vremenskom razdoblju.

Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora je veća od pouzdanost sustava goriva za jedan cilindar. To povećanje pouzdanosti u izrazu (12) postiže se povećanjem ukupnog broja paralelno povezanih cilindara (podsustav (e)). Dakle, veća pouzdanost dovodi do povećanja broja cilindara dizelskog motora, što dokazuju najnovije ugradnje i razvoj dizelskih motora [19].

4. ZAKLJUČAK

Brodski sustavi su složeni tehnički sustavi gdje je pri analizi pouzdanosti neophodno sustav razdijeliti na manje složene dijelove i komponente. Sustav goriva dizelskog motora može se prikazati kao složeni sustav koji se sastoji od pasivno paralelnih i paralelnih podsustava vezanih u seriju.

Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora direktno ovisi o stopi kvara instalirane komponente. Veća pouzdanost sustava goriva dizelskog motora dobije se ako je veći broj pričuvnih komponenta u pasivno paralelnom podsustavu, kao i veći broj komponenta u paralelnom podsustavu.

Pouzdanost sustava goriva dizelskog motora u cjelini je veća od pouzdanosti sustava goriva dizelskog motora za jedan cilindar. Povećanje pouzdanosti sustava goriva dizelskog motora u odnosu na pouzdanost sustava goriva za jedan cilindar postiže se povećanjem ukupnog broja paralelno povezanih komponenta redundantnih podsustava.

Autori predlažu da nastojanja za povećanjem pouzdanosti brodskih sustava, osim povećanjem broja paralelno povezanih komponenta redundantnih podsustava, moraju ići u smjeru izbora kvalitetnije komponente i boljeg održavanja, tj. podešavanja koncepta održavanja. Ured na osnovi baze podataka prikupljene istraživanjem stanja opreme iz dnevnih izvještaja pogona podešava koncept održavanja. To se postiže: analizom pojave kvarova porivnog stroja, identifikacijom značajnih komponenta, funkcionalnih grešaka, definiranjem bazičnih učinaka kvara, stope kvara značajnih komponenta i indeksa rizika.

LITERATURA

- [1] Bukša A., Tudor M., Martinović D., Research of the Failure Incidences in the Diesel-engine Propulsion System, The 7th International Conference on Engine Room Simulators, 14.-15. november 2005, Portorož, Slovenija.
- [2] Vučinić, B., MA – CAD, Maintenance Concept Adjustment and Design, Delft, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, 1994.
- [3] Ozaki, Yoski, An introduction to the ABS Guide for Propulsion Redundancy, Guide for Propulsion Redundancy, The Motor Ship, June, 1997., str. 101 – 112.
- [4] Krapp, R., Why is increased redundancy needed, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference, Hamburg, 21-22 March 1996., str. 13 – 21.
- [5] A. Bukša, M. Tudor, P. Kralj, Analiza kvarova brodskih redundantnih sustava, Pomorstvo, 18(2004), str. 111-120.
- [6] Paul A., Tobias, Ph. D., Applied reliability, New York, VNR Company, 1986.
- [7] Ivanović G., D. Stanivuković, Pouzdanost – analiza i projektovanje, Split, Tehnička uprava SSNO, 1988.
- [8] Pukite, J., P. Pukite, Modeling for Reliability Analysis, New York, Institute of Electronics Engineers, 1998.
- [9] Manfred D. Wojbor A. W., Introductory Statistics and Random Phenomena, Uncertainty, Complexity and Chaotic Behavior in Engineering and Science, Birdhouse Boston 1998.
- [10] M. Tudor, O pouzdanosti brodskih sustava, Pomorstvo, 17(2003), str.11-19.
- [11] K. R. Winn, Turbo charging: Redundancy versus reliability, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21-22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] O. Motomura, Reliability aspects and benefits in low speed marine diesel engines, The Motor Ship, The 18th Annual Marine Propulsion Conference 21-22 March 1996, The Radisson SAS Hamburg.
- [15] Tomašević, M., M. Oršulić, S. Belak, Istraživanje pouzdanosti brodskog dizelskog motora, Naše more, 47(2000), 3-4, str.
- [16] J. Lovrić, Osnove brodske terotehnologije, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet Dubrovnik, 1989.
- [17] A. J. Mokashi, J Wang, A. K. Vermar, A study of reliability-centred maintenance in maritime operations, Marine Policy 26(2002), 325-335.
- [18] Operating manual for diesel engines, Type 7L 400/500, Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg Aktiengesellschaft D – 8900 Augsburg 1, Stadtbachstrasse 1, D 365617 E.
- [19] Hans G. Payer, Powering of Large Container Vessels, The Motor Ship Propulsion, Conference Proceeding 11-12 September 2007.

Summary

SHIP SYSTEM RELIABILITY

When analyzing the reliability of the complex ship systems, it is necessary to define the reliability of the subsystem components, as well as the reliability of the system as a whole. The diesel engine fuel system has been described as a complex technical system consisting of the passive parallel and partly parallel subsystems connected in series. The reliability of the diesel engine fuel system for one cylinder has been analyzed and so has been the reliability of the diesel engine fuel system as a whole. A higher diesel engine fuel system reliability can be obtained if the failure rate is smaller and the number of parallelly connected components of the redundant subsystems is greater. It has been proved that the reliability of the diesel engine fuel system as a whole is greater than the reliability of the diesel engine fuel system for one cylinder. It is therefore proposed that the choice of a more qualitative component (smaller failure rate) and of a better maintenance must be taken into consideration if the ship reliability system is to be increased.

Key words: *reliability, ship systems, fuel system, redundant systems.*

Ante Bukša, Ph. D.

Ivica Šegulja, Ph. D.

Faculty of Maritime Studies Rijeka

Studentska 2

51000 Rijeka

Croatia