

Mr. sc. **Mato Tudor**
Mr. sc. **Predrag Kralj**
Visoka pomorska škola u Rijeci
Studentska 2, Rijeka

Pregledni rad
UDK 629.5.083.4:681.3

UTJECAJ RIZIKA KVARA NA RAČUNALNI ODABIR PRISTUPA ODRŽAVANJU BRODSKIH SUSTAVA

Predmet ovog rada jest određivanje i valorizacija utjecaja rizika kvara na odabir pristupa održavanju brodskih sustava. Troškovi održavanja prilična su stavku u poslovanju pa brodari traže takva rješenja koja će rezultirati efikasnim održavanjem uz minimalne troškove. Zbog toga se za različite sustave koriste različiti pristupi. Koji će pristup biti primijenjen na pojedinom uređaju ili brodskom sustavu, ovisi o više čimbenika. U radu je prikazana primjena računala u odabiru pristupa održavanju. Dan je računalni algoritam koji opisuje odabir pristupa na temelju pohranjenih podataka o utjecaju posljedica kvara. Najvažniji čimbenik pri određivanju pristupa održavanju jest rizik kvara kojim se kvantificira utjecaj posljedica kvara na funkcionalnost, sigurnost, ekonomičnost i ekologiju.

Ključne riječi: rizik kvara, pristup održavanju

1. UVOD

Održavanje brodskih sustava djelatnost je koja ima zadatak spriječiti, a ako već nastupaju, i otklanjati kvarove na brodskim sustavima. Razlikuju se dva pristupa održavanju brodskih sustava: korektivni kojim se otklanjaju kvarovi, i preventivni kojim se nastoji spriječiti nastanak kvarova. Da bi minimizirao ukupne troškove održavanja, brodar pri određivanju politike održavanja ne poštuje striktno ni jedan od prije navedenih pristupa već se koristi kombinacijom obaju. Primjenom samo indirektnog održavanja povećala bi se učestalost kvarova, čime bi veoma porasli indirektni troškovi održavanja (troškovi zbog zastoja broda), a primjenom samo preventivnog održavanja povećala bi se sigurnost, ali i maksimalni troškovi održavanja. Brod je kompleksan skup raznovrsne opreme na kojoj je potrebno obaviti različite poslove održavanja. Oprema koja se danas ugrađuje u brodske sustave temelji se na mikroprocesorskom upravljanju čime je omogućena detekcija i najmanje simptoma kvara.

Dok se donedavno pristup održavanju pojedinog sustava ili u njemu ugrađene komponente temeljio na iskustvu posade i na instrukcijskim knjigama proizvođača, danas sve više brođara primjenjuje računala u odabiru pristupa održavanju, čime se omogućuje implementiranje rješenja koja na temelju unaprijed definiranih pravila i prikupljena znanja o pojedinim posljedicama kvara, te uz ispoštovanje svih sigurnosnih propisa i zadovoljavajuću raspoloživost broda smanjuju troškove održavanja. Koji će se pristup odabrati, ovisi o više čimbenika, ali svakako je najvažniji utjecaj posljedica kvara na funkcionalnost i sigurnost broda, okoliš i ekonomičnost (cijena popravka odnosno gubitak zarade zbog zastoja) što se valorizira indeksom rizika. Pri velikom indeksu rizika, radi sprječavanja kvara poduzet će se preventivno održavanje i, suprotno, ako posljedice kvara nemaju bitan utjecaj, tj. ako je indeks rizika mali, održavanje se neće odmah provesti već će se sačekati kvar da bi se pristupilo korektivnom održavanju.

2. RIZIK KVARA

Rizik znači mogućnost pojave gubitka ili štete. Rizik se povezuje i s neizvjesnosti pojave neželjena događaja (stanja, akcije...) te posljedicama koje iz njega proizlaze.

Poznavanje rizika kvara važno je u analizi opasnosti pri pojavi kvara, a time i pri odabiru odgovarajućeg pristupa održavanju brodskih sustava.

U literaturi se mogu susresti različite definicije rizika kvara. Ovdje će biti izdvojene definicija rizika G. W. E. Nieuwhofa i N. J. McCormicka.

Nieuwhofova definicija rizika

Rizik se može definirati kao promatrani očekivani gubitak ili oštećenje koje nastaje kao posljedica neželjenog događaja.

Neželjeni događaj obuhvaća:

- pojavu neželjenog stanja
- nesreću (npr. greška, lom...)
- pojedine nepovoljne radnje (npr. uništenje, šteta...).

Očekivani gubitak ili oštećenje može se povezati s matematičkim očekivanjem:

Ako je p vjerojatnost da će doći do oštećenja za vrijeme eksploatacije trajanja sustava S , onda je matematičko očekivanje oštećenja sustava definirano kao umnožak p i S .

Očekivani gubitak:

Vjerojatnost { oštećenja sustava S } \times [vrijednost sustava]

U toj se definiciji vrednuje rizik pridružen pojavi pojedinog oštećenja prouzrokovanog pojedinim neželjenim događajem. To znači da se u razmatrani rizik ne uključuju oštećenja čiji su uzroci drugi događaji.

Matematičko očekivanje rizika može se izraziti kao:

$$\text{Rizik} = [\text{Vjerojat.}\{ \text{događaja} \}] \times [\text{vjerojat. oštećenja ako dođe do događaja}]$$

ili

$$\text{Rizik} = [\text{Vjerojat.}\{ \text{događaja} \}] \times [\text{vjerojat. oštećenja/događaj}]$$

McCormickova definicija rizika

Jedan način da se procijeni rizik R za neželjeni događaj jest da se odredi očekivana učestalost događaja U (za određenu jedinicu vremena) te očekivano oštećenje O , što zajedno predstavlja veličinu posljedica pojave događaja.

$$R = U O$$

Izračun rizika za tu definiciju prikazan je u sljedećem primjeru.

Pretpostavimo da je očekivana učestalost neželjenog događaja 1.5 događaj na godinu, a očekivano je oštećenje jednog kvara izraženo u novcu 1000 dolara. Pretpostavimo da je očekivana učestalost konstantna tijekom razdoblja eksploatacije.

Ako uzmemo u razmatranje interval eksploatacije od jedne godine, rizik iznosi:

$$R = U O = 1.5 \times 1000 \text{ dolara} = 1500 \text{ dolara}$$

Ako promatramo interval od dvije godine, rizik ostaje nepromijenjen zato što je očekivana učestalost i dalje 1.5. Izračun ne radi razlike između različitih duljina vremenskog intervala. Zbog toga se umjesto učestalosti, u izračun uvodi vjerojatnost.

Pretpostavimo da želimo izračunati rizik tijekom eksploatacije pet uređaja u vremenskom intervalu od dvije godine. Kvar na jednom uređaju izazvat će štetu od 1000 dolara. Vjerojatnost pojave kvara na jednom uređaju u intervalu od dvije godine je 0.1.

Rizik iznosi:

$$\text{Rizik} \left(\begin{array}{l} \text{Jedan uređaj} \\ \text{u dvije godine} \end{array} \right) = \text{Vjerojat.}\{ \text{kvar (u dvije godine)} \} \times [\text{cijena štete}] \\ = 0.1 \times 1000 \text{ dolara} = 100 \text{ dolara}$$

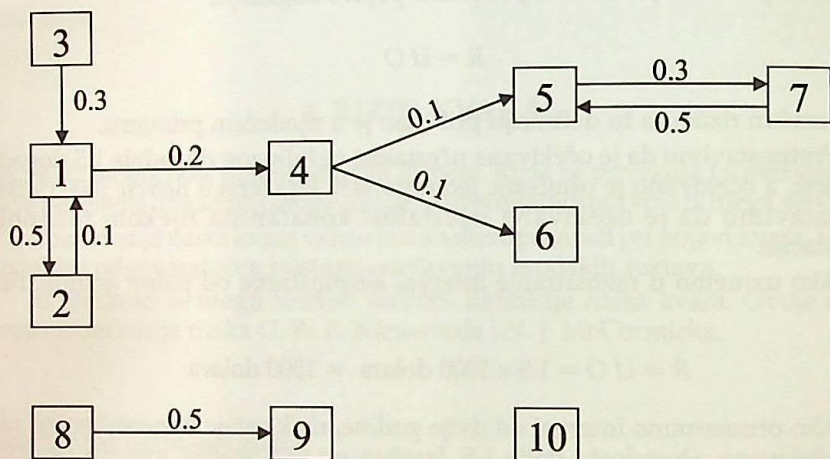
Kada je u eksploataciji pet uređaja, rizik iznosi:

$$\text{Rizik} \left(\begin{array}{l} \text{Pet uređaja} \\ \text{u dvije godine} \end{array} \right) = 5 \times \text{Rizik} \left(\begin{array}{l} \text{Jedan uređaj} \\ \text{u dvije godine} \end{array} \right) = 5 \times 100 \text{ dolara} = 500 \text{ dolara}$$

3. ANALIZA RIZIKA

Analiza rizika opisuje utjecaj kvara na uređaj na kojemu se kvar dogodio kao i na okruženje (sustav u kojem je uređaj ugrađen, brod, okolina broda). Taj se utjecaj ponajprije očituje u smanjenju sigurnosti, pogoršanju funkcionalnosti i ekološkom utjecaju. U analizi kvar se mora klasificirati i kvantificirati prema njegovim posljedicama. Kritičnost posljedica kvara prikazuje se *indeksom rizika* (i_r).

Pri određivanju indeksa rizika treba uzeti u obzir i širenje kvara, tj. kvar na jednoj komponenti može prouzročiti i pojavu kvara na drugim komponentima. Širenje kvara može se predočiti grafom, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Graf širenja kvara

Graf se sastoji od komponenti i veza između njih. Veze pokazuju smjer širenja kvara. Na svakoj vezi između komponenti nalazi se brojčana oznaka koja predstavlja vjerojatnost da će kvar na jednoj komponenti uzrokovati kvar na drugoj.

Na primjer, kod releja zagrijavanje kontakata prenosi se na oprugu i slabi pritisak kontakata. Vrijedi i obratno, slabljenje pritiska zbog slabljenja opruge povećava električni otpor, što će rezultirati zagrijavanjem kontakata.

Poznaje li se širenje kvara na pojedinim sustavima, pri određivanju indeksa rizika, veći indeks treba pridružiti i naizgled manjem kvaru ako postoji velika mogućnost da će on prouzročiti drugi kvar s mnogo težim posljedicama.

Pri određivanju indeksa rizika pozornost se obraća na posljedice kvara i njihov utjecaj na sigurnost i funkcionalnost broda, okoliš, kao i na učestalost kvarova. Veličinu posljedica kvara i njihov utjecaj kvantificira *indeks opasnosti*, a učestalost pojave kvara na komponenti koja se održava, prikazuje se *indeksom učestalosti* (i_w). Taj indeks ovisi o brodu i njegovoj ugrađenoj opremi.

Indeks učestalosti može se izraziti kao:

$$i_u = f(r \cdot \lambda \cdot m)$$

gdje je:

- r – redudantnost uređaja
- λ – indeks kvara
- m – karakteristika materijala.

Indeksa kvara (l) predstavlja recipročnu vrijednost prosječnog vremena između kvara ($MTBF$) i pokazatelj je pouzdanosti.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Svakom kvaru se analizom kvara pridružuje indeks opasnosti (i_o). Broj mogućih vrijednosti indeksa opasnosti je različit.

$$i_o = f(p \cdot s \cdot e \cdot c)$$

gdje je:

- p – utjecaj kvara na funkcionalnost
- s – utjecaj kvara na sigurnost
- e – utjecaj kvara na ekologiju (zagađenje zraka/mora)
- c – utjecaj kvara na cijenu popravka.

Indeks opasnosti možemo prikazati kao broj u rasponu vrijednosti od 0 do 1 gdje je:

- indeks opasnosti 0 – najmanja opasnost od posljedica kvara (kvar ne utječe na sigurnost, funkcionalnost i ekologiju)
- indeks opasnosti 1 – najveća opasnost od posljedica kvara (moguć gubitak broda, katastrofalne posljedice za okolinu i slično).

Primjer mogućeg određivanja veličine indeksa opasnosti prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Indeks opasnosti

indeks opasnosti	veličina	sigurnost	funkcionalnost
1	katastrofalna	gubitak broda	
1 - 0,1	kritična	kritična oštećenja, velike štete	izvan funkcionalnosti (trajanje u danima)
0,1 - 0,01	prihvatljiva	manja oštećenja	izvan funkcionalnosti (trajanje u satima)
0,01 - 0,001	marginalna	moguća oštećenja	smanjenje performansi
0,001 - 0,0000	poželjna	bez oštećenja	puna funkcionalnost

Indeks rizika predstavlja umnožak indeksa opasnosti i čimbenika učestalosti:

$$i_r = i_o \cdot i_u$$

Indeks rizika treba prikazati veličinu (važnost) opasnosti koju imaju posljedice kvara. Definiranje indeksa rizika za pojedine kvarove ovisi o zakonskim propisima, ali i o politici brodar. Brodar određuje koje su posljedice kvara prihvatljive, a koje još ne zahtijevaju otklanjanje kvara. Indeks rizika važan je u određivanju plana održavanja u slučaju kvara (odabir pristupa, metode i poslovi održavanja).

4. ODABIR ZNAČAJNIH KOMPONENTI

S gledišta rizika kvara komponente se dijele na značajne i neznčajne. Značajne su komponente one pri kojima pojava kvara ima značajan utjecaj na funkcionalnost broda, sigurnost, ekologiju ili cijenu popravka. Ostale se komponente s gledišta održavanja mogu razvrstati u skupinu neznčajnih. Njih se ne isplati preventivno održavati, jeftinije je obaviti popravak nakon kvara, tj. kod njih dolazi u obzir samo korektivno održavanje.

Razvrstanje komponenti provodi se na temelju pitanja kao što su:

- Zahtijevaju li zakoni odnosno propisi klasifikacijskih društava održavanje?
- Ima li kvar uzrokovan nedostatkom održavanja za posljedicu mogućnost zastoja broda?
- Je li nedostatak održavanja uzrok neprihvatljiva pada performansi?
- Ima li kvar uzrokovan nedostatkom održavanja za posljedicu veliku cijenu njegova otklanjanja (npr. velika cijena pričuvnih dijelova, utroška materijala, vremena itd)?
- Rezultira li kvar uzrokovan nedostatkom održavanja značajnim smanjenjem sigurnosti?
- Može li kvar uzrokovati ekološke posljedice?

Postavljanjem pitanja vezanih za utjecaj posljedica kvara na sigurnost, funkcionalnost, ekologiju ili cijenu popravka, određuje se da li je komponenta značajna ili ne. Ako je odgovor na bilo koje od pitanja potvrđan, komponentu bi trebalo uvrstiti u značajne komponente.

5. ODABIR PRISTUPA ODRŽAVANJU

Za svaku komponentu određuje se pristup održavanju koji može biti korektivan ili preventivan. Ako održavanjem komponenta treba ostati u funkcionalnom stanju (kvar se još nije dogodio), pristup je održavanju preventivan. O korektivnom pristupu održavanju govori se kada se održavanje poduzme da bi se komponenta vratila u funkcionalno stanje.

Za neznačajne komponente pristup je korektivan jer kvar na njima nema utjecaja na funkcionalnost, sigurnost, ekologiju ili cijenu održavanja. Kod tih je komponenti zato jeftinije obaviti korektivno održavanje nakon kvara nego provoditi preventivno održavanje.

Odabir pristupa održavanju obavlja se zato samo za značajne komponente. Odabir se obavlja na temelju indeksa rizika. Indeks se rizika s gledišta pristupa održavanju može podijeliti u tri skupine:

1. mali – u tom je slučaju indeks rizika zajedno s odabranim pristupom održavanja dobro odabran; mala opasnost za sigurnost, ekologiju, funkcionalnost ili cijenu popravka
2. prihvatljiv – znatan utjecaj na sigurnost, ekologiju, funkcionalnost ili cijenu popravka; trebalo bi preispitati da li se može primijeniti i koji drugi pristup održavanju
3. kritičan – velika opasnost za sigurnosti i/ili funkcionalnost broda; mora ga se nastojati svesti unutar prihvatljivih granica primjenom drugog (preventivnog) pristupa održavanju ili različitim modifikacijama (npr. redundantnošću, modifikacijim ili zamjenom novim dijelom izgrađenim od otpornijeg materijala)

U logičkom dijagramu na slici 2. prikazan je algoritam odabira pristupa održavanju na osnovi indeksa rizika. Ovaj se algoritam pokreće na računalo u slučaju kvara ili u slučaju primijećena simptoma kvara. Kvar je trenutak kada sustav više nije u stanju zadovoljavajuće obavljati svoju funkciju. Trenutku kada nastupa kvar prethodi vrijeme opadanja performansi sustava. Simptom kvara pokazatelj je da se na sustavu događa kvar, odnosno da opadaju njegove performanse. Kvar odnosno simptom kvara može biti detektiran na različite načine. Ako je detektiran vizualno ili preko instrumenta, informacija o kvaru unosi se na računalo održavanja preko konzole. U slučaju da je na uređaju implementiran mikroprocesorski sustav praćenja njegovih performansi, te ako je realizirana brodska računalna mreža, informacija o pojavi kvara može biti direktno prosljeđena s uređaja na kojem se kvar dogodio na računalo održavanja.

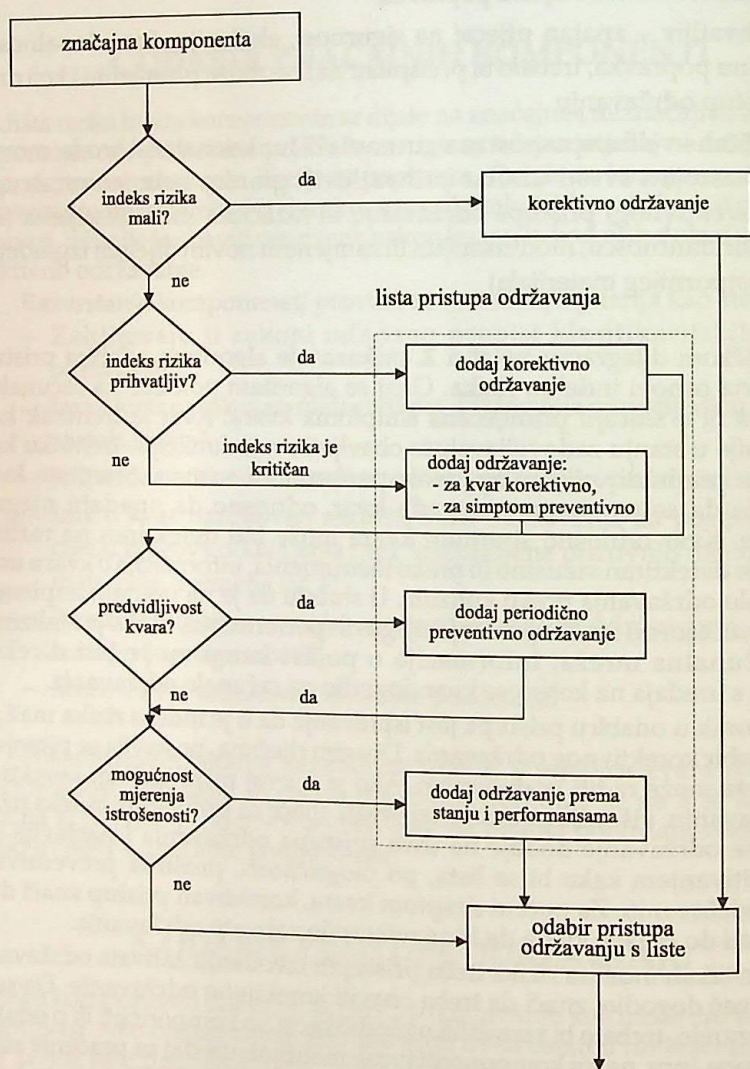
Prvi korak u odabiru pristupa jest ispitivanje da li je indeks rizika mali, što uključuje odabir korektivnog održavanja. Drugim riječima, postavlja se pitanje da li komponenta može raditi pod kvarom. Ako je u ovoj točki izabran korektivan pristup održavanju, više nije potrebno ispitivati. Inače za prihvatljiv indeks rizika, korektivno se održavanje dodaje na listu pristupa održavanja i nastavlja se s daljnjim ispitivanjem kako bi se lista, po mogućnosti, proširila preventivnim pristupima održavanju. Za uočeni simptom kvara, korektivan pristup znači da se može pričekati do pojave kvara da bi se pristupilo zahvatu održavanja.

Kod kritičnih indeksa rizika treba pristupiti izvođenju zahvata održavanja. Ako se kvar već dogodio, znači da treba obaviti korektivno održavanje. Da se taj kvar ne bi ponovio, trebalo bi razmisliti o modifikaciji na komponenti ili o odabiru drugog pristupa (npr. na toj komponenti implementirati uređaj za praćenje stanja ili performansi). Za uočeni simptom kvara treba nastojati spriječiti pojavu kvara, odnosno obaviti preventivno održavanje. Ako se na neki način može odrediti

trenutak pojave kvara, stvara se lista mogućih preventivnih pristupa. Ispituje se da li se kvar može predvidjeti, odnosno može li se mjeriti istrošenost komponente.

Predvidljivost pokazuje da li učestalost pojave kvara raste, pada ili je konstantna (prikazuje se indeksom kvara i srednjim vremenom između pojave kvara). Samo u slučaju rasta učestalosti kvara, predvidljivost je zadovoljavajuća i preventivno periodično održavanje bit će dodano na listu mogućih pristupa održavanja.

Ako se može pratiti odnosno mjeriti trošenje komponente, održavanje prema stanju i performansama dodaje se na listu.



Slika 2. Algoritam odabira pristupa održavanju

Proizvođači važnijih brodskih sustava i uređaja daju svoje preporuke o planiranim zahvatima održavanja, koji su najčešće određeni satima rada glavnog motora ili se trebaju obaviti nakon isteka određenog vremenskog razdoblja. Može se kazati da je za komponente ugrađene u takve sustave moguće predvidjeti kada treba obaviti održavanja. Zato se za te komponente na listu dodaje preventivni periodični pristup održavanju.

Predloženi intervali održavanja od proizvođača su preporuka i mogu biti modificirani zbog specifičnih uvjeta rada, kvalitete uporabljenoga goriva i ulja te ostalih čimbenika koji utječu na stanje i performanse komponente. Za razliku od tih fiksnih termina, primjenom predvidljivosti zasnovane na statističkim metodama obrade prijašnjih kvarova, također će se dobiti vremena održavanja. Taj preventivni pristup dodat će se na listu mogućih pristupa. Poslije, tijekom odabira pristupa održavanju s liste, u ovisnosti o politici održavanja brodarara, donosi se odluka o odabiru jednog od mogućih pristupa.

Iz navedenoga se vidi da za jedan simptom kvara, odnosno pojavu kvara može doći u obzir više mogućih pristupa. U ovisnosti o indeksu rizika, kod kvara se određuje da li će se odmah pristupiti zahvatu korektivnog održavanja ili se s njim može pričekati. Kod simptoma kvara kreira se lista mogućih pristupa održavanju. S liste se odabire najpovoljniji pristup uzimajući pritom u obzir:

- mogućnost primjene (raspoloživost ljudi, opreme, rezervnih dijelova)
- cijenu izvođenja zahvata održavanja
- politiku održavanja brodarara.

Nakon izabranog pristupa održavanju, sljedeći je korak definiranje zahvata održavanja. Zahvat održavanja sadrži detaljan opis svih poslova koje treba obaviti, kao i za to potrebnih resursa (ljudi, alat, materijal, vrijeme).

6. ZAKLJUČAK

Pravilan izbor pristupa održavanju ima znatan utjecaj na efikasnost poslovanja brodarara. Učestalije izvođenje preventivnog održavanja povećat će raspoloživost i produžiti vijek eksploatacije broda, ali će i povećati direktne troškove održavanja. Korektivnim pristupom održavanju uzrokovat će se veći broj zastoja, a time i veći indirektni troškovi održavanja (brod ne obavlja namijenjenu mu funkciju). Zbog tih je razloga potrebno implementirati takva rješenja kojima će se uz zadovoljavanje sigurnosnih zahtjeva postići optimalno održavanje, što znači da se nastoji odabrati pravi pristup održavanju pri kojem će ukupni troškovi biti najmanji. Važan čimbenik pri odabiru pristupa održavanju jest određivanje kakva je mogućnost gubitka ili štete prouzrokovana kvarom što se definira rizikom kvara. Suvremenija rješenja primjene računala u održavanju broda, osim određivanja plana preventivnog održavanja, imaju implementiran odabir i odabir pristupa održavanju koji nastupa u trenutku pojave simptoma kvara. Odabir pristupa održavanju temelji se upravo na analizi rizika kvara. Analiza rizika kvara postupak je koji na temelju pohranjenih podataka na računalu o svim kvarovima i njihovim posljedicama na funkcionalnost, sigurnost, ekologiju i cijenu popravka određuje pristup održavanju.

Dano rješenje doći će do punog izražaja ako je implementirano u cjelokupno rješenje vođenja poslova održavanja preko računala, te ako je realizirana računalna brodska mreža koja omogućuje uključivanje računala održavanja u integrirani informacijski sustav broda. Time se postiže da se simptomi kvarova uočeni na bilo kojem uređaju čiji je procesni kontrolnik dio računalne mreže, prorslijede računalu održavanja, gdje se automatski pokreće proces odabira pristupa održavanju.

LITERATURA

- [1] A. Kelly, M. J. Harris, *Management of Industrial Maintenance*, Newnes - Butterworths, London, 1978.
- [2] A. Kelly, *Maintenance Planning and Control*, Butterworths, London, 1984.
- [3] G. W. E. Nieuwhof, *Risk: A Probabilistic Concept*, *Reliability Engineering* vol. 10, pp. 183-188, Elsevier Applied Science Publishers, London 1985.
- [4] S. Shields, K. J. Sparshott, E. A. Cameron, *Ship Maintenance: a quantitative approach*, Marine Media Management Ltd, London, 1975.
- [5] I. Šegulja, V. Tomas, *Improvement of ship maintenance by applying the RCM method*, *Proceedings of ICTS '97*, pp 189-195, Fakulteta za pomorstvo i promet in Slovensko društvo za znanost v prometu, Portorož, 1997.
- [6] M. Tudor, D. Martinović, *Primjena računala u održavanju broda*, *Zbornik radova Pomorskog fakulteta*, pp. 49-59, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1997.
- [7] M. Tudor, *Primjena računala u dijagnostici kvarova*, *Zbornik radova Pomorskog fakulteta*, pp. 187-195, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1998.
- [8] B. Vučinić, *MA - CAD, Maintenance Concept Adjustment and Design*, Delf University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, Delf, 1994.

Summary

RISK OF FAILURE INFLUENCE ON THE COMPUTER'S SELECTION SHIP'S SYSTEMS MAINTENANCE STRATEGY

The paper aims at determining and valorizing the risk of failure influence on selection of ship borne system and equipment's maintenance strategy. Because the costs of maintenance representation the important part in ship owner business, they are looking for solve that would reduce the costs with efficient the requirements and the extension of law, at the same time satisfying the requirements of safety and ecology. From this reason for different systems are in use different maintenance strategy. What strategy will be apply for several system depend upon more factors. The paper deals with presenting the use of computer in selection the ship's maintenance strategy. On the basis of the information on consequence of failures deposited in computer, given computer's algorithm describes selection of maintenance strategy. Most important factor on selection of maintenance strategy is risk of failure what quantifies influence of failure on functionality, safety, economics and ecology.

Key words: failure risk, maintenance strategy