

# Istraživanje eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja brzookretnih brodskih motora

---

Mihanović, Luka

Doctoral thesis / Disertacija

2015

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:672921>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-07**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

LUKA MIHANOVIĆ

**ISTRAŽIVANJE EKSPLOATACIJSKE  
POUZDANOSTI I POGODNOSTI  
ODRŽAVANJA BRZOOKRETNIH  
BRODSKIH MOTORA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2015

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

LUKA MIHANOVIĆ

**ISTRAŽIVANJE EKSPLOATACIJSKE  
POUZDANOSTI I POGODNOSTI  
ODRŽAVANJA BRZOOKRETNIH  
BRODSKIH MOTORA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: red. prof. dr. sc. Dario Matika  
Komentor: doc. dr. sc. Dean Bernečić

Rijeka, 2015

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF MARITIME STUDIES RIJEKA

LUKA MIHANOVIĆ

**RESEARCH OF EXPLOITABLE  
RELIABILITY AND MAINTAINABILITY  
OF HIGH-SPEED MARINE ENGINES**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2015

## **I. Autor**

**Luka Mihanović**, Ministarstvo obrane RH, Hrvatska ratna mornarica

## **II. Naslov doktorske disertacije**

**„Istraživanje eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja brzookretnih brodskih motora“**

## **III. Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:**

1. Dr. sc. Ante Bukša, izvanredni profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci, predsjednik
2. Dr. sc. Dario Matika, redoviti profesor u trajnom zvanju Hrvatsko vojno učilište „Petar Zrinski“, mentor i član
3. Dr. sc. Dean Bernečić, docent Pomorskog fakulteta u Rijeci, komentor i član
4. Dr. sc. Vladimir Medica, redoviti profesor u trajnom zvanju Tehničkog fakulteta u Rijeci, član

## **IV. Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:**

1. Dr. sc. Ante Bukša, izvanredni profesor Pomorskog fakulteta u Rijeci, predsjednik
2. Dr. sc. Dario Matika, redoviti profesor u trajnom zvanju Hrvatsko vojno učilište „Petar Zrinski“, mentor i član
3. Dr. sc. Dean Bernečić, docent Pomorskog fakulteta u Rijeci, komentor i član
4. Dr. sc. Vladimir Medica, redoviti profesor u trajnom zvanju Tehničkog fakulteta u Rijeci, član

Doktorska disertacija obranjena je 9. srpnja 2015 godine na Pomorskom Fakultetu u Rijeci

## ZAHVALA

Nitko ne može napraviti veliku i zahtjevnu stvar bez pomoći drugih. Stoga koristim ovu prigodu kako bi zahvalio onima koji su mi bili potpora tijekom izrade doktorske disertacije.

U prvom redu hvala redovitom profesoru dr. sc. Dariu Matiki, mom mentoru, koji je imao presudan utjecaj na moj znanstveni razvoj tijekom poslijediplomskog studija. Hvala mu na pomoći tijekom trnovita puta, od upisa na poslijediplomski studij do odabira teme te obrane doktorske disertacije. Hvala na trajnoj podršci i poticaju, na znanju koje nesebično daruje te na neumornom i predanom radu na ovoj disertaciji.

Posebnu zahvalnost dugujem komentoru docentu dr. sc. Deanu Bernečiću na korisnim savjetima, pozitivnim smjernicama te na svekolikoj podršci koju mi je pružio tijekom izrade i obrane doktorske disertacije.

Zahvaljujem članovima povjerenstva za ocjenu i obranu doktorske disertacije izvanrednom profesoru dr. sc. Anti Bukši i redovitom profesoru dr. sc. Vladimiru Medici kako na strpljenju pri čitanju i recenziji disertacije tako i na korisnim primjedbama koje su ovu doktorsku disertaciju učinile boljom.

Tijekom istraživanja, a u cilju izrade disertacije usko sam surađivao sam sa stručnjacima iz tvrtke NCP GRUPA iz Šibenika te bih se svima želio zahvaliti. Posebnu zahvalu dugujem gospodinu Došenu Bariću na prenesenom iskustvu i neprocjenjivim podacima koje je godinama prikupljao te mi ih nesebično ustupio.

Zahvaljujem i kolegama iz Hrvatske ratne mornarice na potpori i razumjevanju tijekom izrade disertacije.

Zahvaljujem svojim bliskim prijateljima na ohrabrivanju i moralnoj podršci u izradi doktorske disertacije.

Na kraju posebno se želim zahvaliti onima koji su najzaslužniji, bez kojih ova disertacija ne bi postojala.

Svojim roditeljima na bezuvjetnoj vjeri i svakodnevnim odricanjima.

Kćerima Marti i Ivi na beskrajnim trenucima veselja i radosti koje su ovaj put činili lakšim.

*Posebnu zahvalnost iskazujem supruzi Zrinki na ljubavi, bezuvjetnoj podršci i neizmjerenoj vjeri u moj uspjeh, kojoj i posvećujem ovu doktorsku disertaciju.*

## SAŽETAK

U doktorskoj disertaciji su prezentirani rezultati istraživanja eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja (popravljivosti) brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora.

Za primjenu opće teorije pouzdanosti na motore tipa „Zvezda“ M 504 B2, koji čine najvažniji dio propulzijskog podsustava raketnih topovnjača HRM (RTOP 11 i RTOP 12), učinjena je statistička obrada i znanstvena analiza velikog broja podataka uzetih iz prakse, a sve u cilju poboljšanja i unapređenja ukupne pouzdanosti cijele flote.

U analizi je predložen model pouzdanosti raketne topovnjače gdje se vide svi njezini podsustavi, a praksa je pokazala da propulzijski podsustav najviše utječe na ukupnu pouzdanost tih brodova, pa time i na ratnu spremnost. Stoga je kao predmet istraživanja odabran glavni motor kojeg je trebalo raščlaniti na podsustave, a sve na osnovu eksploatacijskih podataka i u cilju utvrđivanja pouzdanosti svakog pojedinog podsustava.

Cilj istraživanja je bilo utvrditi funkciju pouzdanosti, funkciju intenziteta kvara i funkciju popravljivosti motora u zahtijevanim operativnim uvjetima Jadranskog akvatorija, te dobivene rezultate usporediti s istraživanjima drugih autora u svrhu sagledavanja trendova i znanstvene relevantnosti.

Znanstveno je dokazano kako Weibullova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti, a očekivano vrijeme rada bez kvara može se dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara.

Jednako tako utvrđeno je kako Normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju pogodnosti održavanja odnosno popravljivosti, a srednja vrijednost vremena održavanja odgovara srednjem vremenu popravka motora po podsustavima.

Rezultati istraživanja se mogu primijeniti i na druge slične brodske motore, ali i na dizelske motore drugih platformi. U disertaciji su povezani rezultati istraživanja i znanstveno priopćenje na način da se povezuju teorijske postavke iz znanstvene literature i neposredna praktična primjena u cilju povećanja operativne raspoloživosti. Neposredna korisnost očituje se u predviđanju kvarova vitalnih podsustava i dijelova dizelskih motora te alociranju potrebnih remontnih kapaciteta, financijskih potreba i nabave pričuvnih dijelova, kao i u povećanju kvalitete obuke i osposobljavanja kadrova u eksploataciji i održavanju. Naglašena je i važnost kvalitetnog vođenja dokumentacije u cilju poboljšanja predloženog modela.

**Ključne riječi:** brodski dizelski motor, eksploatacijska pouzdanost, pogodnost održavanja, popravljivost motora

## SUMMARY

This doctoral dissertation provides results of a research on operational reliability and maintainability of a high speed radial diesel engine. To apply the general theory of reliability on engines type "Zvezda" M 504 B2, which are the most important part of the propulsion subsystem of missile boats (RTOP 11 and RTOP 12), statistical analysis was performed and scientific analysis of a large number of data taken from practice and all with the aim of improving overall reliability of the whole Fleet.

In the analysis proposed model of reliability of missile boats is one where it can be seen all of its subsystem, but practice has shown that the propulsion subsystem has the greatest impact on the overall reliability of these ships, and therefore on the war preparedness. Therefore, as a research subject selected is a main engine which had to be broken down in subsystem and all based on exploitation data and all in order to ascertain the reliability of each individual subsystem.

The aim of this research was to determine a reliability function, failure intensity function as well as maintainability function of the engine in demanding operational conditions in the Adriatic sea and to compare the results with those obtained by different researches in order to perceive trends and their scientific relevance.

It has been concluded that the Weibull distribution approximates the best the operational reliability and the expected trouble-free period of operation can be well approximated by the mean time between failures.

It has also been found out that the normal distribution best approximates the empirical function of maintainability or engine reparability and the mean maintenance time complies with the mean engine repair time by subsystems.

The research results can be applied to other similar boat engines as well as to diesel engines of different platforms. This doctoral dissertation connects the research results with scientific reports in the way that theoretical hypotheses from the literature are related to direct applications in order to improve the operational availability.

Immediate usefulness is evident in predicting failures in vital subsystems and of different diesel engine parts and in the allocation of necessary ship repair facilities, financial needs and spare parts procurement as well as in improving the quality of training and qualification. Emphasize the importance of high-quality document management in order to improve the proposed model.

**Key words:** marine diesel engine, exploitable reliability, maintainability, engine reparability.

## 1 UVOD

Raketne topovnjače udarni su dio pomorskih snaga Hrvatske ratne mornarice i koriste se u svrhu ostvarivanja prevlasti na moru. Svoje borbene zadaće izvode velikim brzinama i zato pripadaju kategoriji brzih i lakih borbenih platformi. U tom cilju posebna je pozornost u izboru pogonskog sustava posvećena mogućnosti postizanja vršne brzine od 36 čv i maksimalne trajne brzine od 32 čv, a s druge strane potrebno je postići, pri velikim brzinama, malu istisninu broda. U drugi se plan stavljaju propulzijske karakteristike broda pri plovidbi ophodnom brzinom, dok mogućnost plovidbe malim brzinama nije prihvatljiva.

Operativni zahtjevi raketne topovnjače uvjetuju da brodski motori moraju biti s jedne strane što lakši i ekonomičniji uz mogućnost razvijanja velikih snaga, a s druge strane visoko pouzdani. Epoha u kojoj su raketne topovnjače projektirane i izgrađene uvjetovala je ugradnju radijalnih dizelskih motora ruske proizvodnje tipa M 504 B2, izuzetno niske mase po jedinici snage i ograničenog resursa motora.

### 1.1 Predmet istraživanja

Raketne topovnjače Hrvatske ratne mornarice danas su opremljene brzookretnim radijalnim dizelskim motorima lake konstrukcije M 504 B2 maksimalne snage od 3676 kW, proizvođača „ZVEZDA“ Sankt Peterburg, a uvode se novi brodski motori istog tipa M 504 B2 povećanog resursa motora. Upravo je zbog toga središnje mjesto u provedenim istraživanjima u funkciji ove disertacije zauzeo glavni dizelski motor M 504 B2, koji zajedno s reduktorom i izvrstivom spojkom, vratilnim vodom<sup>1</sup> i vijcima s fiksnim krilima čini propulzijski podsustav raketne topovnjače.

Rezultati dosadašnjih istraživanja [10], [13], [15], [22], [25], [26], [34], [35], [45] nedvojbeno su pokazali kako je najveći broj zastoja brodskog pogonskog podsustava uvjetovan upravo pojavom kvarova na glavnom dizelskom motoru. Zbog toga je predmet istraživanja ove doktorske disertacije bio brzookretni radijalni brodski dizelski motor s posebnim osvrtom na pogonski motor raketne topovnjače M 504 B2.

---

<sup>1</sup> Vratilni vod definiran je kao strojni dio sastavljen od jednoga vratila ili više njih kojima se zakretni moment pogonskoga stroja prenosi na brodski propeler: *Brodograđevno nazivlje / glavni i odgovorni urednik Krunoslav Horžinek. Zagreb : Jadranbrod, 1995.* Uobičajen naziv strojnog elementa za prijenos snage sa brodskog motora na brodski vijak je osovinski vod (vratilni vod), stoga u daljnjem tekstu koristimo pojam osovinski vod.

## 1.2 Cilj istraživanja

Unatoč novim saznanjima o eksploatacijskoj pouzdanosti brodskih dizelskih motora [8], [13], [14], [15], [21], [22], [27], [29], [34], koja su doprinijela značajnim poboljšanjima u teoriji i praksi, još uvijek ostaje velik prostor za daljnja znanstvena istraživanja u smjeru povećanja otpornosti i eksploatacijske pouzdanosti brodskih dizelskih motora u slučaju kvarova uzrokovanih svojstvima materijala, načinom i uvjetima uporabe i odabranom tehnologijom održavanja dizelskih motora.

To se posebno odnosi na brzookretne radijalne dizelske motore, ugrađene na raketne topovnjače.

Stoga je cilj istraživanja ove doktorske disertacije bio:

- a) znanstveno istražiti eksploatacijsku pouzdanost i popravljivost brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora s posebnim osvrtom na eksploatacijsku pouzdanost motora M 504 B2 u zahtjevnim operativnim uvjetima u jadranskom akvatoriju;
- b) odrediti funkciju pouzdanosti i funkciju intenziteta kvara te funkciju pogodnosti održavanja (popravljivosti) brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora M 504 B2 u zahtijevanim operativnim uvjetima.

Dobivene rezultate bilo je potrebno usporediti s istraživanjima eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja (popravljivosti) dizelskih motora drugih autora u svrhu sagledavanja trendova i znanstvene relevantnosti ove disertacije.

## 1.3 Hipoteze

Istraživanja su pokazala kako se glavni motor raketne topovnjače M 504 B2 najviše koristio u osnovnom režimu rada ( $750 \text{ min}^{-1}$ ), što je izrazito nepovoljan režim rada i suprotan je preporukama proizvođača za uporabu takvih brodskih motora [54], [60]. Korištenje broskog motora u nepovoljnim režimima može uzrokovati pojavljivanje kvarova i nepouzdanost broskog motora. Budući da se radi o pojavi koja nije u skladu s preporukama proizvođača, a operativni uvjeti uporabe i mogućnosti HRM-a zahtijevali su upravo takav način korištenja motora u realnim uvjetima, ovakvu je pojavu bilo potrebno znanstveno istražiti. Dakle, potrebno je bilo u takvim operativnim uvjetima odrediti karakteristike eksploatacijske pouzdanosti i funkciju pogodnosti održavanja glavnog motora raketne topovnjače, brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2.

Polazeći od prije navedenog, hipoteze ove doktorske disertacije su sljedeće:

- $H_0^1$ : Weibullova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora.
- $H_0^2$ : Očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora može se dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara (MTBF), tj. vrijedi da je  $E(T) = MTBF$ , ako se funkcija gustoće kvara ravna prema Weibullovoj distribuciji.
- $H_1^1$ : Normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju pogodnosti održavanja odnosno popravljivosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora.
- $H_1^2$ : Srednja vrijednost vremena održavanja  $M$  odgovara srednjem vremenu popravka brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora po podsustavima ( $MTTR_{ps}$ ).

Kriterij prihvatanja ili odbacivanja hipoteza bili su rezultati istraživanja prikazani u poglavljima od 4 do 7 ove disertacije.

#### 1.4 Metodologija

Primijenjena je kombinacija više istraživačkih metoda za potrebe znanstvenog istraživanja, analize i prezentacije rezultata istraživanja. Metoda matematičkog modeliranja linearnih i nelinearnih sustava koristit će se za razvoj potrebnih matematičkih modela, a za provjeru postavki i rezultata eksperimentalna metoda i metoda simulacije. U formuliranju općih zaključaka o topologijama i značajkama brodskih pogonskih sustava i brodskih dizelskih motora koristit će se induktivna i deduktivna metoda. U opisu problema i donošenju temeljnih postavki za vrednovanje dobivenih rezultata istraživanja koristit će se metode deskripcije, dedukcije, analize i sinteze. U okviru sistematizacije i usporedne tehničko-ekonomske analize prikupljenih podataka primijenit će se metode klasifikacije te metoda formalne i komparativne analize.

Od ostalih metoda koristit će se metoda kompilacije za pregled dosadašnjih istraživanja i radova te metoda intervjua za prikupljanje potrebnih informacija od strane nositelja provedbe održavanja brodskih motora i proizvođača opreme.

#### 1.5 Pregled dosadašnjih istraživanja

Kako bi se detaljno proučilo područje istraživanja, pretražene su najznačajnije baze radova i knjiga kao što su: *Web of Science (WoS)*, *Science Direct*, *Scopus*, *Springer Link*, *SNAME Libraries*, *AIAA E-Library*, *Google Scholar* i sl. Iako je prikupljeno više od stotinu bibliografskih jedinica, za potrebe ove prijave odabrano je njih 61. One su podijeljene u tri skupine: Knjige (6), Radovi objavljeni u znanstvenim časopisima i zbornicima (43), Priručnici, upute (12).

Područje pouzdanosti složenih tehničkih sustava iznimno je širokog opsega i po svojoj složenosti zahtijeva interdisciplinarna, pa i multidisciplinarna istraživanja.

U znanstvenoj i stručnoj literaturi postoji velik broj radova u kojima je razmatrana problematika terotehnologije, održavanja kao i teorija pouzdanosti tehničkih sustava.

Unatoč činjenici da je pouzdanost često obrađivano znanstveno područje, još uvijek je aktualno i nedovoljno istraženo.

Opća načela pouzdanosti, teoretske postavke pouzdanosti i elementi pogodnosti održavanja te njegova uloga u pouzdanosti složenih tehničkih sustava opširno su razrađeni i objašnjeni u [3] i [6].

Učinkovitost složenih tehničkih sustava definirana je kao složen odnos između raspoloživosti, pouzdanosti, pogodnosti održavanja i sposobnosti izvršenja postavljenih ciljeva. Navedeni elementi učinkovitosti pojašnjavaju međusobni odnos elemenata u tehničkom sustavu. Poznavanje elementa učinkovitosti olakšava odlučivanje koja komponenta degradira učinak tehničkog sustava. Barringer, H. P. u provedenim istraživanjima zaključuje kako je upravo pouzdanost tehničkog sustava najznačajniji faktor za postizanje boljih svojstava složenih tehničkih sustava [9].

Tehnički sustavi su vrlo složeni sustavi i zahtjevno je analizirati njihovu pouzdanost, raspoloživost i sigurnost. Veliki broj podsustava i komponenata te njihova operativna složenost uzrok je kompleksnosti procjene, predviđanja i optimizacije njihove pouzdanosti, raspoloživosti i sigurnosti. Isto tako važno je sagledati utjecaj radnog procesa na promjenu pouzdanosti tijekom vremena korištenja složenog tehničkog sustava. Soszynska-Budny, J. istražuje zajednički model operativnog procesa sustava i pouzdanosti s više različitih stanja primijenjenih na istraživanje razvoja pouzdanosti, sigurnosti i raspoloživosti složenog tehničkog sustava (kontejnerske mosne dizalice) [42]. Autor razrađuje pristup vrlo važnom problemu, povezivanju pouzdanosti sustava i operativnog procesa uključujući i međusobnu interakciju.

Teorija pouzdanosti je razvijena da bi se osigurala operativnost složenih tehničkih sustava (podsustava i dijelova sustava), međutim pojam *funkcionalna pouzdanost* nije potpuno istražen i u cijelosti definiran, iako se učestalo koristi. Shubinsky, I. B. i Schäbe, H. uočili su kako se definicija funkcionalne pouzdanosti temelji na pojmovima kao što su svojstva, kvaliteta i funkcija složenih tehničkih sustava [41]. Ujedno naznačuju glavne razlike između funkcionalne i strukturne pouzdanosti kao i sličnosti između funkcionalne sigurnosti sustava i funkcionalne pouzdanosti te međusobnu interakciju istraživanih pojmova.

U analizi pouzdanosti složenih tehničkih sustava često se polazi od tvrdnje kako je intenzitet kvarova stalan. Kolowrocki, K. istražuje više svojstven pristup procjeni pouzdanosti sustava s degradirajućim svojstvima pouzdanosti tijekom vremena.

Autor pretpostavlja da tehnički sustav može imati više stanja (osim dva osnovna „u radu“ i u „kvaru“). Uzimajući u obzir važnost sigurnosti i učinkovitosti operativnog procesa složenih tehničkih sustava, razumno je proširiti pristup u analizi njihove pouzdanosti.

Glavni naglasak je na analizi sustava s više mogućih stanja njegovih komponenti upravo zbog važnosti takvog pristupa u analizi sigurnosti, procjeni i predviđanju te analizi učinkovitosti radnog procesa složenih tehničkih sustava [27].

Bukša, A. i Šegulja, I. istražuju ponašanje složenih tehničkih sustava u eksploataciji [13]. Brodski sustavi su složeni tehnički sustavi kojima tijekom eksploatacije niz čimbenika ugrožava pouzdani i dugotrajni rad. U analizi pouzdanosti složenih brodskih sustava neophodno je odrediti pouzdanost komponenata podsustava i pouzdanost cijelog sustava. Sustav goriva dizelskog motora je 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 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.

Ratni brodovi konstruirani su i izgrađeni da bi zadovoljili strogo postavljene uvjete za sredstva specijalne (borbene) namjene. Mogući zastoji i havarije, kao rezultat neodgovarajućeg održavanja, mogu biti uzrokom brojnih posljedica. Matika, D. i Mihanović, L. na temelju empirijskih podataka o kvarovima rada odredili su empirijske funkcije pouzdanosti  $R_e(t)$ , intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i gustoće kvara  $f_e(t)$  glavnog brodskog dizelskog motora. Istraživanjem je utvrđeno da Weibullova distribucija s parametrima  $\beta=2,613$  i  $\eta=400$  dobro aproksimira pouzdanost brzohodnog brodskog dizelskog motora lake konstrukcije. Analizirana je serijska konfiguracija pouzdanosti podsustava brodskog dizelskog motora, utvrđena je učestalost kvarova te vrijednosti intenziteta kvara po podsustavima [33].

Stalnim rastom složenosti tehničkih sustava i njihovih podsustava, uzrokovanim sve strožim zahtjevima korisnika opreme, često dolazi do kvarova. Posljedica toga je da aspekti pouzdanosti, održavanja i dostupnosti tehničkih sustava dolaze u prvi plan.

Kvarovi tehničkih sustava i njihovih elemenata uzrokuju nepouzdan rad i povećane troškove održavanja.

Kunar, S.; Ghosh, G.; Mandal, K.; Bose, D. i Sau, P. S. u svojoj studiji bave se određivanjem pouzdanosti i raspoloživosti složenog tehničkog sustava, motora dizelske lokomotive. Analiza pouzdanosti je provedena pomoću Weibullove distribucije [29].

Brodovi Hrvatske ratne mornarice složeni su tehnički sustavi, sastavljeni od velikog broja podsustava i elemenata. Kao tehnički sustav brod je složen, dinamički, deterministički, otvoren i realan sustav. On se sastoji od desetina tisuća elemenata različite pouzdanosti i različite važnosti za ukupnu pouzdanost i učinkovitost broda.

Najveći dio tehničke opreme, usprkos djelovanju čimbenika sa slučajnim karakterom raspodjele nastanka kvarova u vremenu, svoje radne karakteristike ne gubi odjednom, već u procesu koji se odvija i traje. Nagovještaj nekog kvara prisutan je mnogo prije nastanka značajnih kvarova u eksploataciji tehnološke opreme ili eventualnog kvara.

Bukša, A.; Martinović, D. i Vidaković, M. u radu su istraživali uzroke nastanka kvara brodskog dizelskog motora [14]. Istraživanje su temeljili na izvornim podacima dnevnih izvještaja o dizelskim motorima u razdoblju od trinaest godina. Porivni stroj je dizelski motor tipa MAN 7L 400/500. Iz dnevnika stroja za istraživanje su korišteni izvorni operativni podaci o kvarovima i akcijama održavanja kod pojave kvara dizelskog motora za vrijeme plovidbe (tijekom 24 sata) u razdoblju od 13 godina. Analizom zastoja definirane su značajne komponente koje se najviše kvare u eksploataciji složenog tehničkog sustava; tu spadaju ispušni ventil, rasprskач i pumpa goriva. Istraživanjem je detektirana najugroženija komponenta dizelskih motora (ispušni ventil) s najvećom stopom kvara. Autori predlažu povećanje operativnosti i sigurnost plovidbe broda smanjenjem učinka kvara komponenata brodskog pogona, koje se najviše kvare u eksploataciji, odabirom kvalitetnijih komponenti, namještanjem koncepta održavanja te redundantnošću sustava.

Unatoč značajnom napretku u tehnologiji, broj kvarova novoizgrađenih dizelskih motora u stalnom je rastu. Kubo, A.; Okawara, K.; Iwaya, K.; Igari, K. i Ohno, N. u svom radu istražuju uzroke kvarova novoizgrađenih dizelskih motora. Tijekom razdoblja od nekoliko godina prikupili su podatke o kvarovima na novo ugrađenim dizelskim motorima na brodove 15 japanskih brodarskih kompanija. Istraživanje su proveli u 33 brodogradilišta na 341 novogradnji: od 341 dizelskog motora kvar je detektiran na 86 novo ugrađenih dizelskih motora.

Istraživanjem su zaključili da do kvarova dolazi zbog konstrukcijskih nedostataka, grešaka u materijalu i tvorničkih grešaka u procesu izrade dizelskih motora [28].

Kiriya, N. [25] izradio je statističku studiju pouzdanosti sustava glavnog brodskog motora koristeći podatke dobivene iz baze podataka o kvarovima i zastojima brodske opreme. Autor u radu razjašnjava pouzdanost glavnog motora i njegove značajke.

U literaturi [26] istog autora prikazan je pregled baze podataka SRIC (Ship Reliability Investigation Committee) za pouzdanost brodskog porivnog sustava, a koja se koristila u Japanu u razdoblju od 1982. do 1992. godine.

Šegulja, I. i Bukša, A. u svom radu definiraju jedan način održavanja brodskog pogona koji obuhvaća sustav brodskog održavanja, pristupe broskom održavanju i održavanje u broskom životnom ciklusu.

U sustav brodskog održavanja ulaze četiri glavna čimbenika koji utječu na funkcionalnost održavanja broda: to su operater, okolina (luke pristajanja, luke u slučaju potrebe, klima, uvjeti na moru), zakonitost (propisi koje brod mora zadovoljiti) i samoodržavanje. Predočen je najstariji model održavanja opreme, a izvodi se nakon što je došlo do kvara. Preventivno održavanje može biti periodično i preventivno održavanje prema stanju. U slučaju periodičnog održavanja, interval održavanja može biti temeljen na kalendaru ili vremenu rada (vijeku). Politika periodičnog održavanja temeljena na vijeku (periodi održavanja po instrukcijskim knjigama proizvođača) općenito se koristi na brodovima. Preventivno održavanje prema stanju može biti povremeno ili kontinuirano. Prikazana je struktura troškova održavanja i sve faze održavanja u broskom životnom ciklusu [44]. Tomas, V.; Šegulja, I. i Čišić, D. analiziraju načine i probleme suvremenih strategija održavanja na osnovu svjetskih iskustava [46]. Temeljem analize stanja održavanja brodskih sustava, kod nas i u svijetu, dat je prijedlog koje bismo strategije održavanja mogli primijeniti, pod kojim uvjetima i u kakvoj kombinaciji, a navedene su i odgovarajuće preporuke za primjenu i implementaciju strategija održavanja. Također su analizirani i mogući efekti.

Vujanović, N. definira i obrađuje faktore koji definiraju proceduru predviđanja pogodnosti održavanja tehničkih sustava [49]. Pojašnjava osnovne terminološke pojmove, navodi elemente predviđanja pogodnosti održavanja te daje pregled najčešćih metoda za predviđanje pogodnosti održavanja.

Održavanje sustava je multidisciplinarni proces s velikim brojem promjenljivih ulaznih veličina, među kojima posebno značajno mjesto zauzimaju ponašanje sustava u periodu njegovog rada ili njegove eksploatacije i struktura sustava na kojima počiva efektivnost sustava.

Ponašanje sustava očituje se jednostavnim, ali temeljnim pokazateljima: vrijeme u radu i vrijeme u kvaru, a u njihovoj funkciji su gotovost sustava i pouzdanost. U ovom radu Đurović, D. uz rezultate istraživanja na određenom tehničkom sustavu, prikazuje međusobnu ovisnost, sustav – efektivnost sustava – održavanje, odnosno utjecaj održavanja kao osnovne logistike efektivnosti sustava [20].

Avdić, H. i Hasanović, M. u [7] prikazuju utjecaj upravljanja sustavom održavanja na operativnu raspoloživost složenog tehničkog sustava.

Upravljanje sustavom održavanja tehničkih sustava prije svega treba omogućiti operativno ili kratkoročno planiranje, ali i planiranje za duži vremenski period te inovacije sustava održavanja i samih tehničkih sustava.

U užem smislu, upravljanje procesom održavanja provodi se radi smanjenja vremena „u kvaru“ na minimum i stabiliziranja odvijanja procesa rada tehničkih sustava odnosno držanja vrijednosti operativne raspoloživosti tehničkih sustava u granicama dopuštenih odstupanja.

Suvremene koncepte u upravljanju održavanjem tehničkih uređaja, opreme, instalacije i tvorničkih postrojenja u svom radu prikazuju Klarin, M.; Misita, M. i Spasojević-Brkić V. [24]. Izložene su ukratko karakteristike pojedinih metoda i strategija održavanja. Poseban naglasak stavljen je na upravljanje zasnovano na riziku i analizirana je mogućnost uvođenja ovog koncepta u druge industrijske segmente osim u procesni, kemijski i energetske, što je i primarna djelatnost primjene pristupa održavanju zasnovanom na riziku (RBIM koncepta).



## **2 PODJELA RATNIH BRODOVA I BRODSKI PODSUSTAVI**

Ratni brod odnosno brod borbene namjene, za razliku od brodova trgovačke mornarice, Pomorskim zakonikom definiran<sup>2</sup> je kao plovni objekt na kojem se ističu vanjske oznake raspoznavanja ratnih brodova Republike Hrvatske, ima vojnu posadu podvrgnutu vojnim propisima i pod zapovjedništvom je mornaričkih časnika Hrvatske ratne mornarice.

### Vrste ratnih brodova

Jedinstvena klasifikacija ratnih brodova ne postoji; danas svaka država ima svoju klasifikaciju. Prema Hrvatskoj enciklopediji prevladava podjela ratnih brodova na klase (vrste), potklase (podvrste) i tipove, s obzirom na njihovu namjenu i taktičko-tehnološka svojstva. Uvriježene klase borbenih ratnih brodova su: podmornica, nosač zrakoplova, nosač helikoptera, krstarica, razarač, prateći (eskortni) brod, patrolni brod, raketni čamac, torpedni čamac, topovnjača, minolovac, minopolagač i desantni brod.

U Republici Hrvatskoj podjela odnosno klasifikacija ratnih brodova definirana je čl. 3. Pravilnika o službi na brodovima Oružanih snaga Republike Hrvatske. Pravilnik razlikuje sljedeće tipove ratnih brodova:

- Ratni brod u sastavu plovne postrojbe je brod koji ustrojstveno pripada plovnoj postrojbi i u njezinu sklopu izvršava zadaće.
- Samostalan ratni brod je brod koji ustrojstveno nije u sastavu plovne postrojbe.
- Izdvojeni ratni brod je onaj koji je privremeno izvan sastava plovne postrojbe i koji je poslan na samostalno izvršavanje određene zadaće.
- Zapovjedni ratni brod je brod s kojeg zapovijeda zapovjednik plovne postrojbe.
- Admiralski ratni brod je brod na koji je ukrcan časnik čina admirala.

### Skupine i klase

Prema podjeli na skupine ratnih brodova razlikujemo: borbene brodove koji su specijalno građeni, naoružani brodovi sposobni samostalno provoditi borbene zadaće. Borbeni brodovi su opremljeni za neposredno vođenje borbe, ili su to brodovi koji posrednom suradnjom pomažu ili utječu na pripremu odnosno ishod borbe.

Pomoćni brodovi služe kao tehničko osiguranje ratnoj floti te joj pružaju potporu. Specijalni brodovi su razne vrste brodova specijalne namjene.

Klasa ratnog broda definirana je specijalnim naoružanjem kojim je brod naoružan, a čija uporaba daje najbolji rezultat djelovanja u izvršenju zadaća.

---

<sup>2</sup> Pomorski zakonik, pročišćeni tekst zakona, NN 181/04, 76/07, 146/08, 61/11, 56/13 članak 5., točka 6.

Unutar iste klase brodovi se dijele na potklase, ovisno o broju i kvaliteti naoružanja, daljini doplova, brzini plovidbe i istisnini. Ubrzanim razvojem broskog naoružanja došlo je do podjele brodova unutar potklase na tipove. Tipovi broda odražavaju vrijeme njihove gradnje, znanstveno-tehničku razinu ratne tehnike i brodogradnje te projekt gradnje broda.

#### Vrste brodova Hrvatske ratne mornarice

Raketna topovnjača (RTOP) je ratni brod namijenjen za protubrodske, protupodmorničke i protuavionske akcije te za ophodnu službu i službu spašavanja. Rabi se i u protudesantnim operacijama, operacijama eskorta te za uništavanje protubrodskih borbenih raketa. Istisnina RTOP-a iznosi 500-1600 t. Uobičajeno su naoružane višestrukim raketnim lanserima za rakete malog ili srednjeg dometa, torpednim uređajima za protupodmornička torpeda i raketnim bacačima dubinskih bombi, univerzalnim i protuavionskim topovima i helikopterskim platformama. Raketne topovnjače spadaju u klasu korvete.

Minopolagač je brod namijenjen za transport i polaganje mina. To je posebno građen ili preuređen brod odnosno plovno sredstvo.

Minolovac je brod specijalne namjene posebno konstruiran, izgrađen i opremljen u cilju pretrage akvatorija „sumnjivog“ za sigurnu plovidbu u svrhu pronalaska i uklanjanja svih vrsta protubrodskih minskih sredstava.

#### Desantni brod

Desantni brod je specijalni ratni brod namijenjen za skupljanje, prevoženje i brzo iskrcavanje postrojbi mornaričkog pješništva i kopnene vojske te za desantne operacije.

#### Pomoćni brod

Pomoćni brodovi osiguravaju borbeno i svakodnevno djelovanje borbenih brodova i njihovih sredstava. U sastavu HRM-a razlikujemo:

Školski brod, služi za školovanje i vježbanje pripadnika ratne mornarice. Posebno je građen ili rekonstruiran i prikladno opremljen učionicama za nastavu i radionicama za izvođenje vježbi i navigaciju.

Transportni brod, služi za prijevoz vojnika i ratnog materijala te za opskrbu flote.

Vodonosac, služi za opskrbu pitkom vodom.

Podjela ratnog broda na brodske podsustave započinje njegovim projektiranjem kao složenog tehničkog vojnog sustava.

Budući da Hrvatska ratna mornarica raspolaže s više vrsta različitih ratnih brodova, fokus ove doktorske disertacije usmjeren je na ratne brodove borbene namjene kao što su raketne topovnjače.

## 2.1 Raketna topovnjača kao tehnički sustav

Raketne topovnjače klase „Kralj Petar Krešimir IV“ su brzi laki raketni brodovi. Prema tehničkim karakteristikama najsloženiji su i najubojitiji brodovi u sastavu HRM-a. RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“ te RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“ predstavljaju zajedno s RTOP-21 „Šibenik“, RTOP-41 „Vukovar“ te RTOP-42 „Dubrovnik“ njenu glavnu udarnu snagu. Važno je istaknuti da su RTOP-11, RTOP-12 i RTOP-21 najbolji primjeri sposobnosti hrvatske brodograđevne industrije u projektiranju, gradnji i integraciji svih sustava ratnog broda ovog tipa. Navedeni brodovi svojim su projektiranim značajkama prilagođeni uvjetima uporabe u području odgovornosti HRM-a, točnije karakteristikama i osobitostima Jadranskog mora. Značajno je naglasiti kako su, prema iskustvima posada raketnih topovnjača HRM-a, pomorstvena svojstva RTOP-11 i RTOP-12 u uvjetima Jadranskog mora bolja od inače dobrih pomorstvenih svojstava raketnih topovnjača RTOP-41 i RTOP-42 klase „Helsinki“. Na slici 2.1 prikazane su raketne topovnjače RTOP-11 i RTOP-12 u združenoj plovidbi.



Slika 2.1 RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“, RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“

U Brodogradilištu „Kraljevica“ u Kraljevici izgrađene su ukupno dvije jedinice ove klase uz određene izmjene projekta na drugoj jedinici i nazvane su po hrvatskim kraljevima:

- RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“<sup>3</sup>,

<sup>3</sup> Kralj Petar Krešimir IV (Veliki) hrvatski je kralj iz dinastije Trpimirovića, sin kralja Stjepana I. Vladao je od 1058. do 1074. godine. Pod njegovom vlašću oporavlja se i ponovno uzdiže hrvatsko kraljevstvo. Od 1060. godine nosi naslov „kralj Hrvata i Dalmatinaca“ (*regnum Dalmatiae et Chroatiae*). Zagospodario je Dalmacijom, a proširio je vlast i nad Bosnom. U njegovo vrijeme uzdižu se hrvatski gradovi Nin i Biograd, a osnovao je i Šibenik (Krešimirov grad).

- RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“<sup>4</sup>.

RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“ i danas je ponos HRM-a i hrvatske ratne brodogradnje (slika 2.2).



Slika 2.2 RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“

Razvoj raketnih topovnjača klase „Kralj“, kako su klasificirane u HRM-u odnosno klasa „Cobra“ kako su klasificirane u NATO-u i stranoj literaturi, započet je krajem osamdesetih godina prošloga stoljeća na Brodarskom institutu u Zagrebu kao projekt R-02. Projekt je razvijan u suradnji s riječkim Brodoprojektom, a za potrebe Jugoslavenske ratne mornarice. Projekt je bio službeno prekinut 1989., a 1991. godine bio je ponovno pokrenut. Projektirane su po uzoru na raketne topovnjače klase „Rade Končar“<sup>5</sup>.

Posao izgradnje novih raketnih topovnjača dodijeljen je „Titovom brodogradilištu“ u Kraljevici, a bile su planirane najmanje dvije. Za obje raketne topovnjače nabavljen je i isporučen veći dio opreme.

---

<sup>4</sup> Kralj Dmitar Zvonimir, hrvatski kralj, vladao je od 1075. do 1089. godine. Kralj Petar Krešimir IV, kao slavonskog bana, 1070. godine izabrao ga je za svog suvladara i nasljednika. Vratio je Hrvatskoj Dalmaciju, kojom je nakratko nakon smrti Petra Krešimira IV zavladała Venecija. Papa Grgur VII ga je, putem svojih poslanika, svečano okrunio i pomazao za kralja Hrvatske i Dalmacije znakovima kraljevske vlasti: žezlom, mačem i stijegom, a Zvonimir mu prisegnuo vjernost čime je osigurao politički i obrambeni savez sa Svetom Stolicom, državnopravno priznanje Kraljevine Hrvatske (*regnum Dalmatiae et Chroatae*) i njen stabilan međunarodni položaj. Oženio se Jelenom Lijepom, sestrom ugarskog kralja Ladislava. Stolovao je u Kninu (Zvonimirov grad).

<sup>5</sup> RTOP klase „Rade Končar“ građene su u razdoblju od 1978. do 1983. godine u „Titovom brodogradilištu“ Kraljevica, a izgrađeno ih je ukupno šest.

Tijekom 1991. godine planirano je porinuće i završetak opremanja RTOP-11 uz provedbu svih ispitivanja, a potom odmah početak radova izgradnje RTOP-12. RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“ izgrađena je kao novogradnja broj 384. U trenutku izbijanja Domovinskog rata RTOP-11 bila je završena oko 90 %, ali je zalaganjem djelatnika brodogradilišta, koji su otezali s njenom izgradnjom, ostala u Hrvatskoj. RTOP-11 je porinuta 21. ožujka 1992. godine pod imenom „Kralj Petar Krešimir IV“ (slika 2.3), a HRM-u je predana 7. lipnja 1992. godine. RTOP-11 već je na prvoj ispitnoj plovidbi imala i prvo bojno gađanje.



*Slika 2.3 Porinuće RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“ 21. ožujka 1992. godine*

Ubrzo nakon dovršenja RTOP-11 pristupilo se izmjenama i poboljšanjima izvornog projekta R-02, pa je tako izrađen izmijenjeni projekt oznake R-03 iz 1993. godine. „Kralj Dmitar Zvonimir“ izgrađen je kao novogradnja broj 500 u Brodogradilištu „Kraljevica“<sup>6</sup> (slika 2.4); kobilica je položena 1993., a porinuće je bilo planirano za kraj 1995. godine. Međutim, zbog završetka rata, financijskih problema i problema s nabavom opreme brod je porinut tek 30. ožujka 2001. godine (slika 2.5), a HRM-u je predan 16. rujna 2001. godine.

---

<sup>6</sup> Brodogradilište „Kraljevica“ slijednik je „Titovog brodogradilišta“ u Kraljevici.



*Slika 2.4 RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“ u izgradnji*

RTOP-12, u odnosu na svog prethodnika RTOP-11, ima duži trup za jedno rebro, odnosno 63 cm, a do izmjena je došlo i u unutrašnjosti broda (kormilarnica, strojarnica, raspored prostorija, sustav nadzora pogona i brodskih sustava...). Strojarnica je projektom bila prilagođena za prihvrat MTU motora, ali oni nisu nabavljeni niti ugrađeni zbog embarga na uvoz naoružanja i opreme tijekom Domovinskog rata. Stoga su u Rusiji kupljeni motori M 504 B2 koji su ugrađeni i na RTOP-11.



*Slika 2.5 RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“ prilikom porinuća 30. ožujka 2001. godine*

Porinućima „kraljeva“ kumovali su predsjednici RH i vrhovni zapovjednici Oružanih snaga Republike Hrvatske (u daljnjem tekstu Oružane snage), što još jednom ukazuje na vrijednost i značaj brodova kako za Oružane snage tako i za Republiku Hrvatsku.

Obje raketne topovnjače danas su operativne i nalaze se u sastavu Flotile HRM-a. Osnovni podaci o izgradnji raketnih topovnjača prikazani su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Osnovni podaci o izgradnji RTOP-11 i RTOP-12

|                    | RTOP-11       | RTOP-12       |
|--------------------|---------------|---------------|
| Kobilica položena: | 1991.         | 1993.         |
| Porinuće:          | 21. 3. 1992.  | 30. 3. 2001.  |
| Primopredaja:      | 7. 6. 1992.   | 16. 9. 2001.  |
| Kum broda:         | Franjo Tuđman | Stjepan Mesić |

### Značajke raketnih topovnjača

Raketne topovnjače spadaju u kategoriju brzih i lakih borbenih platformi. Pogon raketnih topovnjača klase „Kralj“ čine tri brzookretna radijalna dizelska motora M 504 B2, ukupne izlazne snage 11328 kW, koji pokreću svaki po jednu osovinu s vijkom fiksnog koraka. Ovakav pogon omogućuje maksimalnu brzinu od 36 čvorova.

Motori M 504 B2 ugrađeni su u skladu s doktrinom uporabe brodova koja predviđa plovību broda u zaklonu obale, brzi izlazak u svrhu raketnog udara i potom brzi povratak u zaklon. Raketne topovnjače klase „Kralj“ mogu ukrcati zalihe hrane, vode i goriva koje im omogućavaju desetodnevnu autonomiju.

U slučaju nuklearno-biološko-kemijskog (u daljnjem tekstu NBK) udara mogu se nepropusno zatvoriti i pružiti zaštitu posadi. Potpuno su operativne do stanja mora 4 prema WMO-u<sup>7</sup>, a smanjenjem snage motora mogu ploviti do mora razine 6 prema WMO-u. Podijeljene su na deset vodonepropusnih odjeljaka, a mogu plutati s potopljenom dva susjedna odjeljaka.

### Osnovne značajke raketnih topovnjača RTOP-11 i RTOP-12

Osnovne značajke raketnih topovnjača i njihovih borbenih sustava su sljedeće<sup>8</sup> [50], [55]:

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Duljina preko svega.....       | 53,63/54,23 m, |
| Najveća širina na rebrima..... | 8,54 m,        |
| Visina na glavnom rebru.....   | 4,45 m,        |
| Najveći gaz na vijcima.....    | 2,94/2,83 m.   |

Istisnina:

<sup>7</sup> Uzburkano more s valovima visine od 1,25 do 2,5 metara prema Svjetskoj meteorološkoj organizaciji (World Meteorological Organization). Navedena veličina odgovara stanju uzburkanog mora 4-5 po tradicionalnoj Beaufortovoj (Boforovoj) skali.

<sup>8</sup> Navedena su dva podatka, prvi vrijedi za RTOP-11, a drugi za RTOP-12.

- standardna.....315/312 t,
- puna.....382/384 t.

**Brzina:**

- maksimalna trajna.....32,5 čv,
- vršna..... 36,5 čv.

Doplov.....1700/900 morskih milja brzinom 18/32 čv.

Autonomnost.....10 dana.

Broj članova posade..... 31(7 + 12+ 12 )/32(7 + 13+ 12).

**Propulzija:**

- tri brzookretna radijalna dizelska motora tipa M 504 B2 ukupne vršne snage 10710 kW pri  $2000 \text{ min}^{-1}$  te tri osovine s vijcima fiksnih krila.

**Električna energija:**

- osnovni napon 3 x 380 V, 50 Hz,
- tri dizelska električna agregata po 120 kW.

**Automatizacija:**

- sustav daljinskog nadzora i upravljanja propulzijom i brodskim sustavima.

**Topničko naoružanje:**

- univerzalni brodski top Bofors 57/1 mm, D70 MK1,
- automatski PZ/PR gatling top AK-630 30/6 mm,
- integrirani sustav motrenja i upravljanja paljbom.

**Raketno naoružanje:**

- 4 x 2 protubrodске rakete SAAB RB-15B, s vlastitim sustavom upravljanja.

**Minsko naoružanje:**

- montažne tračnice za 6/10 sidrenih morskih mina SAG-1 ili 4/7 na dnu ležećih mina AIM-M70.

**Protuelektronska borba:**

- detektor laserskog zračenja,
- detektor radarske opasnosti,
- sustav lansera lažnih ciljeva i dima AISH Barricade.

**Navigacija i veze:**

- navigacijski radar Racal-Decca BT 502 / Bridge Master II,
- žiromkompas Anschuetz Standard IV / STD 4S,
- elektromagnetski brzinomjer, ultrazvučni dubinomjer,

- satelitska navigacija (GPS), GMDSS<sup>9</sup>, Navtex prijamnik,
- sustav radijskih veza s podsustavom za daljinsko upravljanje,
- brodski zapovjedni interfon,
- dva sustava bez baterijskih telefona, opći i oružni.

Borbena zaštita:

- NBK zaštita borbenih centara i nastambi (na RTOP-11 i strojarnica), sustav NBK orošavanja vanjskih površina broda,
- sustav kompenzacije broskog magnetizma,
- automatsko otkrivanje prodora vode i požara, automatsko gašenje požara inertnim plinom, sredstva za borbenu otpornost broda (BOB),
- protudiverzantski sonar PP10M, RIZ / ESR-150 Koden.

#### Tehnički i operativni zahtjevi uporabe raketnih topovnjača

Velika brzina i pokretljivost broda te snažno protubrodsko raketno i univerzalno topničko naoružanje povezano integriranim sustavom motrenja i upravljanja vatrom osiguravaju raketnim topovnjačama sposobnosti za provedbu zadaća u području površinskog ratovanja, morskog ratovanja, ograničenog protupodmorničkog ratovanja, protuzračne borbe, elektronske borbe te provedbu zadaća u području operacija pomorskog presretanja. Zadaće provode samostalno ili u sudjelovanju s drugim raketnim topovnjačama i/ili raketnim bitnicama (MOL<sup>10</sup>).

Brodovi su tehnički sagrađeni i opremljeni sustavima detekcije i samozaštite te djelomične dekontaminacije broda i posade od NBK oružja.

Medicinsko osiguranje ograničeno je na pružanje prve pomoći od strane članova posade koji su osposobljeni za pružanje prve pomoći [58].

Raketne topovnjače svoja djelovanja u pomorskim operacijama provode brzim, iznenadnim, odlučnim, dobro pripremljenim i energično vođenim raketnim udarima te topničkim djelovanjima, nanoseći protivniku što veće gubitke, stvarajući uvjete za djelovanja drugim brodovima taktičkog plovnog sastava, a potom se zajedno s njima brzo povlače u zaštićena područja (potkope, maskirni vezovi, luke) [58].

---

<sup>9</sup> Global maritime distress and safety sistem, Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost

<sup>10</sup> MOL – mobilni obalni lanser (raketna bitnica)

RTOP su dio udarnih pomorskih snaga, namijenjene za:

- raketni udar po ratnim i trgovačkim brodovima,
- topnički boj s jednakim i slabije naoružanim protivničkim brodovima na srednjim daljinama,
- protuzračnu obranu (PZO) plovnih sastava i ključne infrastrukture (pomorske baze, energetska i industrijska postrojenja) na malim i srednjim visinama,
- protupodmorničko osiguranje (PPd) vlastitih plovnih sastava i ključnih područja na pomorskim putovima,
- pružanje ograničene topničke potpore snagama kopnene vojske tijekom provedbe združenih operacija,
- polaganje minskih zapreka na mogućim putovima nailaska protivničkih pomorskih snaga,
- zaustavljanje i pregled sumnjivih brodova kao dio operacija pomorskog presretanja i provedbe embarga,
- traganje i spašavanje,
- prevoženja u cilju ubacivanja ili izvlačenja snaga posebne namjene,
- izviđanje.

Ostvarenje namjene i provedbe postavljenih zadata raketnih topovnjača značajno je učinkovitije zajedničkim borbenim djelovanjem raketnih topovnjača s mobilnim raketnim bitnicama naoružanim protubrodskim raketnim sustavom te združenim djelovanjem sa zračnim snagama.

#### Zadace

Zadace raketnih topovnjača izvode se iz njihove namjene; dijele se na osnovne i dopunske, a njihovim izvršenjem osigurava se postizanje željenog cilja.

Osnovne zadace RTOP-a:

- raketni udar po manjim i većim ratnim brodovima i plovnim sastavima na otvorenom moru i na prilazima obalnom moru samostalno i/ili zajedničkim borbenim djelovanjem s ostalim udarnim pomorskim i zračnim snagama,
- raketni udar po snagama desanta na otvorenom moru i prilazima obalnom moru združenim djelovanjem s kopnenim i zračnim snagama,
- protuzračna obrana manjih taktičkih sastava pomorskih snaga tijekom plovidbe i u područjima baziranja,
- topnička djelovanja po ratnim brodovima protivnika.

Dopunske zadaće raketnih topovnjača:

- topnička djelovanja po određenim ciljevima na kopnu,
- protuzračna obrana ključne infrastrukture (pomorske baze, energetska i industrijska postrojenja),
- protupodmorničko osiguranje ključnih područja na pomorskim putovima (kanali i prilazi lukama),
- polaganje minskih zapreka u području ključnih pomorskih putova,
- presretanje, zaustavljanje i pregled sumnjivog broda,
- traganje i spašavanje unesrećenih osoba na moru, u ratu i u miru,
- prevoženja u cilju ubacivanja/izvlačenja snaga,
- izviđanje.

Stupanj borbenog naprezanja u izvršenju postavljenih zadaća raketne topovnjače ovisi o operativnoj situaciji i različit je u pojedinim razdobljima borbenih djelovanja.

Raketne topovnjače provode zadaće samostalno, zajednički s pomorskim snagama drugih država te združeno s kopnenim i zračnim snagama.

#### Načela uporabe

Raketne topovnjače su udarni dio pomorskih snaga Hrvatske ratne mornarice koje se upotrebljavaju u svrhu ostvarivanja prevlasti na moru u dnevnim i noćnim uvjetima i u uvjetima NBK ugroze. Svoje borbene zadaće raketne topovnjače provode tako da što kraće vrijeme borave na moru kako bi s prihvatljivim rizikom bile izložene mogućim djelovanjima pomorskih, kopnenih i zračnih snaga protivnika.

Udaljenost područja borbenog djelovanja raketne topovnjače od područja baziranja/okupljanja ovisi:

- o taktičkom radijusu pojedine raketne topovnjače,
- o prevlasti i superiornosti protivnika u području borbenih djelovanja, prvenstveno u zraku,
- o osiguranju borbenih djelovanja raketne topovnjače,
- o važnosti cilja,
- o mogućnosti provedbe mjera maskiranja.

Kako bi se sposobnosti raketne topovnjače što učinkovitije iskoristile, potrebno je povesti računa o naprezanju članova posade, brodskih sustava, uređaja i mehanizama.

Borbeno naprezanje u načelu ovisi:

- o vremenu provedenom na moru tijekom izvršenja zadaća i operativnog tempa,
- o organizaciji sustava baziranja i logističkog osiguranja,
- o potrebnom vremenu za pripremu predstojeće zadaće,
- o potrebnom vremenu za psihofizički oporavak posade.

Raketne topovnjače najčešće se upotrebljavaju zajedno s raketnim bitnicama, a učinkovite rezultate raketnog udara postižu i u združenim djelovanjima sa zrakoplovnim snagama (lovci-bombarderi i helikopteri). Raketne topovnjače samostalno raketno i topnički djeluju kada raspolažu sigurnim podacima o cilju, kada cilj nije ili je slabo branjen vlastitim borbenim sustavima ili borbenim sustavima proturaketne obrane plovnog sastava. Raketne topovnjače borbene zadaće provode u svim uvjetima vidljivosti. Noć i ograničena vidljivost, uz primjenu određenih mjera maskiranja i obmanjivanja, povoljni su za postizanje iznenađenja i provedbu raketnih napada. Danju i za dobre vidljivosti zadaće provode samo ako posjeduju sigurne podatke o cilju i na relativno malim daljinama od područja baziranja. Ovo značajno ovisi i o općoj situaciji u zračnom prostoru (borbenim mogućnostima zrakoplovstva i zračnoj prevlasti).

Odgovarajućim manevrima kursom i brzinom te taktičkim postupcima raketne topovnjače:

- u samostalnim djelovanjima izbjegavaju neposredni kontakt s protivničkim zrakoplovstvom i ostalim manjim i većim ratnim brodovima;
- u zajedničkim/združenim djelovanjima, kada provode svoje osnovne namjenske zadaće, raketne topovnjače provode raketne udare i prihvataju topnički boj s protivničkom raketnom topovnjačom ili slabije naoružanim ratnim brodovima u cilju uništenja ili odbijanja njihovog napada, te s ostalim brodovima taktičkog plovnog sastava omogućavaju izvršenje zadaće;
- odbijanje napada protivničkih manjih ratnih brodova, raketne topovnjače provode načelno, zajedničkim/združenim djelovanjem s mobilnim obalnim lanserima i zrakoplovstvom.

Učinkovita borbeno uporaba raketne topovnjače zahtjeva visok stupanj uvježbanosti borbenog djelovanja s taktičkim elementima obalne obrane, prvenstveno sa službom Obalnog motrenja i navođenja (OMIN) i mobilnim raketnim bitnicama.

Pojedinačne manje i veće ratne brodove i njihove sastave, ovisno o taktičkoj situaciji, području borbenog djelovanja i vidljivosti, napada se iznenadno. Broj raketa u plotunu treba osigurati provedbu postavljene zadaće.

Tijekom upotrebe raketne topovnjače neophodno je koristiti karakteristike strme i razvedene obale u cilju smanjenja učinaka djelovanja protivnika. Hidronavigacijskom osiguranju borbenih djelovanja potrebno je posvetiti veliku pozornost.

Pomorski promet i vlastite pomorske snage raketne topovnjače osiguravaju posredno od napada manjih i većih ratnih brodova protivnika iz očekujućeg područja na ugroženim pravcima ili neposredno, ovisno o taktičkoj situaciji. U tome se oslanjaju na elemente obalne obrane, a poglavito na sustave OMIN-a, zračnog motrenja i navođenja (ZMIN) i na mobilne raketne bitnice.

#### Projektirano stanje brodova

Raketne topovnjače HRM-a projektirane su kao tipični jednonamjenski brodovi, optimizirani za zadaću nanošenja iznenadnih i brzih raketnih udara na protivničke brodove, uz topničko djelovanje na nadvodne, zračne i kopnene ciljeve (s raketama do 90 km, a topom do 10 km). U tom cilju posebna je pozornost posvećena postizanju sljedećih svojstava RTOP-a:

- Velika vršna brzina od 36 čv i maksimalna trajna brzina od 32 čv, pri čemu su u drugom planu propulzijske karakteristike u slučaju plovidbe ophodnom brzinom, a nije predviđena mogućnost plovidbe malim brzinama.
- Najveća (maksimalna) trajna brzina je brzina koju brod postiže pri najvećem vremenski neograničenom opterećenju glavnih motora. Ona iznosi 36 čv, a to se u skladu s postojećim normama odnosi na čist brod na srednjoj (normalnoj) istisnini, u povoljnim vremenskim uvjetima i u prosječnim klimatskim uvjetima.
- Kratkotrajna vršna brzina je ona koju brod postiže pri najvećem mogućem opterećenju glavnih motora, vremenski ograničenom u skladu s dopuštenim profilom opterećenja za nominalni resurs glavnih dizelskih motora, a iznosi od 32 do 34 čv.
- Ophodna brzina je prosječna brzina kojom brod plovi pri ophodnji, a glavna joj je značajka maksimalna ekonomičnost (što manja potrošnja goriva po prijedenoj milji).

Scenarij ophodnje pokazao je da bi ophodna brzina trebala biti između 12 i 15 čv, s time da plovidba nižom od te dvije brzine prilično produžuje vrijeme trajanja ophodnje.

- Najmanja trajna brzina je najmanja brzina kojom brod može duže vremena ploviti bez štete za pogonsko postrojenje, a prema dominantnim scenarijima iznosi od 6 do 8 čv.

- Vezano za veliku brzinu trebalo je postići što manju istisninu broda, zbog čega su ugrađeni brzookretni radijalni brodski dizelski motori, izuzetno niske mase po jedinici snage, ali i ograničenog resursa motora. Procjena pokazuje kako je deklarirani resurs motora M 504 B2 od 2000 radnih sati do generalne revizije u uvjetima uporabe RTOP-a u HRM-u dovoljan za 4 do 5 godina eksploatacije.
- Niska silueta i mogućnost ulaska u potkope, zbog čega je i jarbol snižen i zbijen, za posljedicu ima nešto nepovoljniji smještaj antena i senzora.
- Što manja nadvodna zamjetljivost, posebno termovizijska, zbog čega su ispusi glavnih motora izvedeni podvodno, uz ionako bučne vijke (koji u cilju postizanja što veće brzine broda nisu izvedeni kao malošumni) dodatno povećava podvodnu zamjetljivost.

Pomorstvena svojstva omogućuju uspješno borbeno djelovanje napadnom brzinom na moru do stanja 4 po WMO-u, ali ne i dugotrajnu plovidbu ophodnom brzinom na valovitom moru, jer tada dolazi do brzog zamora posade.

## 2.2 Sustavi raketne topovnjače

Općenito se za brodove može reći da su oni složeni tehnički sustavi, jer su sastavljeni od velikog broja podsustava i elemenata.

Brod je kao tehnički sustav složen, otvoren i realan sustav sa svojim dinamičkim i determinističkim svojstvima. Sastoji se od desetina tisuća podsustava, sklopova i elemenata različite eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja, ali i različite važnosti za njegovu operativnu raspoloživost [2], [4].

Operativna raspoloživost tehničkog sustava predstavlja zapravo vjerojatnost da će sustav, kada se koristi pod specificiranim uvjetima, zadovoljavajuće funkcionirati u bilo kojem trenutku vremena, pri čemu vrijeme koje se promatra obuhvaća vrijeme korištenja  $t_k$  i vrijeme zastoja  $t_z$  tehničkog sustava.

Operativna raspoloživost  $O_r$  određena je izrazom [3], [6]:

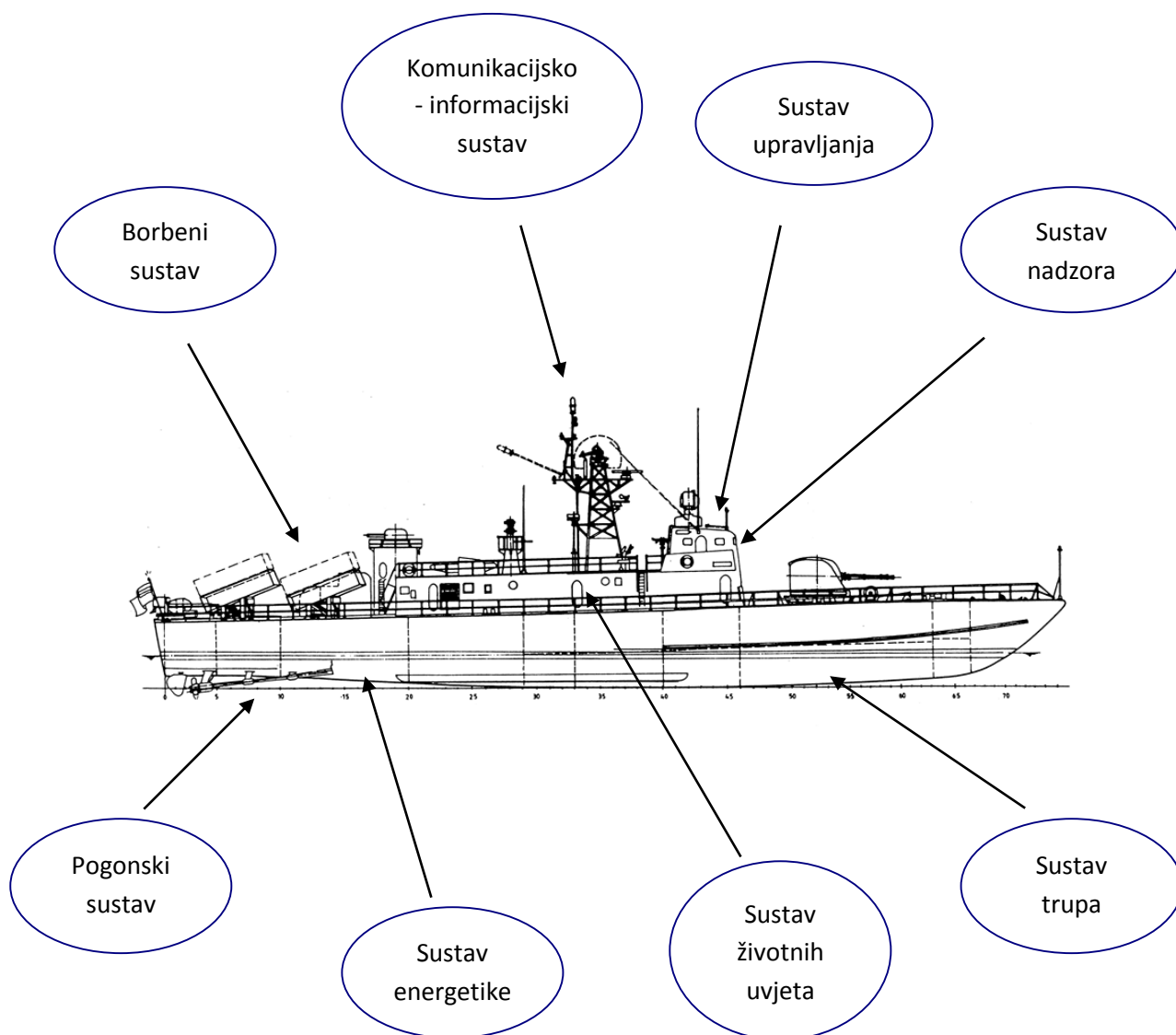
$$O_r = \frac{t_k}{(t_k + t_z)} \quad (2.1)$$

Vrijeme korištenja sustava  $t_k$  je zapravo ono vrijeme kada do izražaja dolazi eksploatacijska pouzdanost tehničkog sustava, dok je vrijeme zastoja  $t_z$  ono vrijeme kada do izražaja dolazi pogodnost održavanja tehničkog sustava. Prema tome, vrijeme je ključan čimbenik ili ključna kategorija u ocjeni sposobnosti tehničkog sustava u izvršenju funkcije za koju je namijenjen, uključujući i kvarove i poteškoće koji se javljaju tijekom popravka i održavanja tehničkog sustava.

Za ratne brodove, kao specifične plovne objekte, u načelu su prisutna dva stanja: operativno i neoperativno stanje, i zato se pod pogodnošću održavanja podrazumijeva zapravo vjerojatnost da će ratni brod na kojem se pojavio kvar biti vraćen u operativno stanje u toku predviđenog vremena zastoja kojeg čini aktivno vrijeme popravka, logističko vrijeme i administrativno vrijeme. Operativna raspoloživost odnosno vraćanje ratnog broda u operativno stanje ovisi prije svega o vrsti ratnog broda i stanju brodskih podsustava; stoga će se u nastavku pozornost usmjeriti na određenu kategoriju ratnog broda i brodske podsustave te njihovu međusobnu povezanost koja u osnovi može biti serijska ili paralelna.

Temeljni sustavi ratnog broda kao složenog tehničkog sustava su (slika 2.6):

- borbeni sustav (sustavi naoružanja i upravljanja vatrom),
- komunikacijsko-informacijski sustavi (uređaji za orijentaciju, motrenje i komunikaciju),
- sustav upravljanja (uređaji za kormilarenje i upravljanje),
- sustav nadzora (uređaji za nadzor svih brodskih funkcija),
- pogonski sustav,
- sustav energetike i razvoda (uređaji za proizvodnju i razvod električne energije),
- sustav životnih uvjeta (sustavi koji omogućuju život i preživljavanje na brodu, npr. uređaji za čuvanje i pripremanje namirnica, sanitarni, klimatizacijski i protupožarni uređaji),
- sustav trupa (plovni statički nosač svih brodskih uređaja, obuhvaća i uređaje kaljuže, balasta, veza i sidrenja).



Slika 2.6 Sustavi ratnog broda

### 2.2.1 Pogonski sustav

Centralno mjesto u ovoj disertaciji zauzima pogonski sustav namijenjen za pokretanje broda, odnosno osiguranje brodskog poriva za plovidbu pramcem u raznim režimima te krmom, uključujući dinamiku i manevar broda u skladu s projektiranim karakteristikama.

Pogonski sustav raketne topovnjače dijeli se na sljedeće podsustave:

- podsustav goriva,
- podsustav maziva,
- podsustav nadzora i upravljanja,
- podsustav hlađenja,
- podsustav visokotlačnog zraka,
- propulzijski podsustav.

Podsustav goriva na ratnim brodovima tipa „Kralj“ osnovno je namijenjen za osiguranje zaliha goriva potrebnih za rad glavnih pogonskih i pomoćnih dizelskih motora na brodu. Osim osnovne namjene podsustav goriva osigurava i sljedeće funkcije neophodne za funkcioniranje broda kao složenog tehničkog sustava:

- ukrcaj goriva na brod,
- skladištenje goriva na brodu,
- pretakanje goriva iz tanka u tank u svrhu trima broda,
- prečišćavanje (separiranje goriva),
- nadopunjavanje potrošnih tankova goriva,
- iskrcaj goriva s broda.

Podsustav goriva sastoji se od tri međusobno povezana podsustava:

- podsustav za ukrcaj goriva,
- podsustav pretakanja i separiranja goriva,
- podsustav dobave goriva glavnim i pomoćnim motorima.

Podsustav ulja temeljno se koristi za podmazivanje pogonskih i pomoćnih dizelskih motora na brodu. Pored osnovne namjene podsustav ulja namijenjen je i za:

- ukrcaj ulja u skladišne tankove,
- nadopunjavanje cirkulacijskih brodskih tankova ulja,
- predgrijavanje ulja,
- punjenje ulja u pomoćne motore i kompresore,
- predpodmazivanje glavnih motora,
- pretakanje ulja,
- crpljenje ulja iz spojki glavnih motora,
- iskrcavanje ulja izvan broda.

Prema literaturi [54] koja definira brodske sustave na raketnoj topovnjači, podsustav ulja sastoji se od četiri podsustava:

- podsustav ukrcaja i pretakanja ulja,
- podsustav predgrijavanja ulja i predpodmazivanja glavnih dizelskih motora,
- podsustav podmazivanja glavnih dizelskih motora,
- podsustav rabljenog ulja.

Podsustav hlađenja strojeva i uređaja namijenjen je za odvođenje topline nastale kao rezultat rada strojeva i uređaja. Nastala toplota odvodi se izravno morskom vodom u otvorenim sustavima ili pomoću rashladne emulzije u zatvorenim sustavima hlađenja.

U zatvorene sustave hlađenja spadaju sustavi hlađenja glavnih i pomoćnih dizelskih motora; svi ostali sustavi hlađenja su otvoreni. Podsustav hlađenja sastoji se od sljedećih podsustava:

- podsustav za hlađenje glavnih dizelskih motora rashladnom emulzijom,
- podsustav za predgrijavanje glavnih dizelskih motora emulzijom,
- podsustav za hlađenje ispuha glavnih dizelskih motora morskom vodom,
- podsustav za hlađenje pomoćnih dizelskih motora, ispuha pomoćnih dizelskih motora i kompresora morskom vodom,
- podsustav za hlađenje rashladnika zraka krmene i pramčane strojarnice,
- podsustav za hlađenje ležajeva statvenih cijevi,
- podsustav za hlađenje rashladnih uređaja klimatizacijskih podsustava.

Podsustav komprimiranog zraka služi za proizvodnju, skladištenje i raspodjelu komprimiranog zraka brodskim potrošačima. Podsustav komprimiranog zraka sastoji se od dva podsustava:

- podsustav visokotlačnog zraka,
- podsustav zraka za opću brodsku službu.

Podsustav komprimiranog zraka na raketnoj topovnjači koristi se:

- za preket i upućivanje glavnih dizelskih motora,
- za preket spojke glavnih dizelskih motora,
- za podizanje tlaka u podsustavu rashladne emulzije glavnih dizelskih motora,
- za rad artiljerijskog naoružanja,
- za potrebe opće brodske službe.

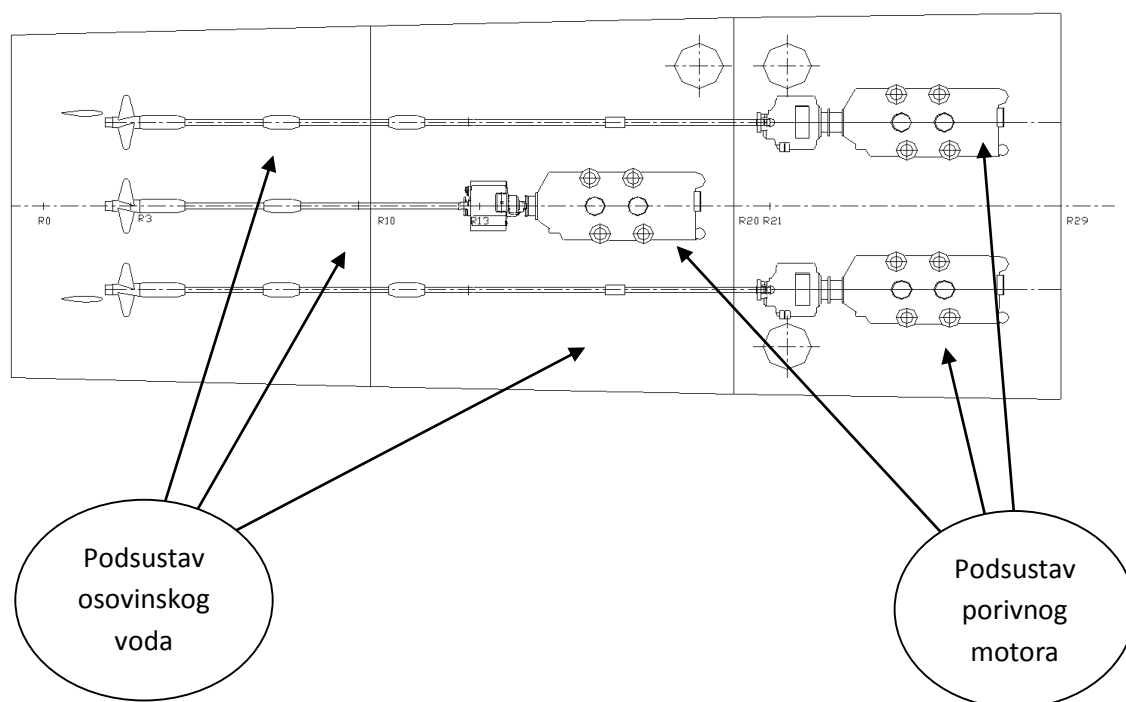
Propulzijski podsustav raketne topovnjače sačinjavaju tri brzookretna radijalna dizelska motora M 504 B2 (dva bočna u pramčanoj strojarnici i jedan srednji u krmenoj strojarnici), opremljena reduktorom i spojkom čine jednu cjelinu. Na dizelskom motoru i reduktoru smješten je mehanizam za preket reduktora i upravljanje brzinom vrtnje dizelskog motora. Dizelski motori elastično su temeljeni na brodsku strukturu. Izlazna osovina reduktora povezuje dizelski motor s vratilnim vodom koja završava vijkom s fiksnim krilima.

### **2.2.2 Propulzijski podsustav raketne topovnjače**

Redundantnost propulzijskog podsustava raketne topovnjače osigurana je ugradnjom tri nezavisna podsustava propulzije koji mogu raditi nezavisno jedan od drugoga ili spregnuti, u kombinaciji dva bilo koja ili sva tri zajedno. Podsustav propulzije sačinjavaju:

- podsustav osovinskog voda,
- podsustav porivnog motora.

Na slici 2.7 prikazani su podsustavi brodske propulzije.



Slika 2.7 Podsustavi propulzije na RTOP-u

Podsustav osovinskog voda sačinjavaju dva bočna i srednji osovinski vod. Bočni osovinski vodovi su jednaki, svaki ukupne duljine 13580 mm, oslonjeni su na pet ležajeva te spojeni s desnim i lijevim glavnim dizelskim motorom.

Srednji osovinski vod duljine je 7364 mm, oslonjen je na tri ležaja i spojen sa srednjim glavnim dizelskim motorom. Odrivni ležaj nalazi se u reduktoru glavnog dizelskog motora.

Bočni osovinski vodovi sastavljeni su od:

- vijka,
- matice vijka,
- osovine vijka,
- dvodijelnih gumenih ležajeva u skrokovima i statvenoj cijevi,
- statvene cijevi,
- grafitne šupernice,
- sigurnosnog prstena,
- međuosovine,
- ležaja međuosovine,
- pregradne osovine.

Srednji osovinski vod sastavljen je od:

- vijka,
- matice vijka,
- osovine vijka,
- dvodijelnih gumenih ležajeva u skrokovima i statvenoj cijevi,
- statvene cijevi,
- grafitne šupernice,
- sigurnosnog prstena.

Brodске osovine izrađene su od kvalitetnog Cr-Ni-Mo čelika kovanjem i poboljšane su. Osovine su sastavljene od sljedećih elemenata: tijela osovine, brončanih košuljica i zaštitne presvlake.

Vijci su jednaki na sva tri osovinska voda, izuzev uspona (dva su desnovojna jedan je lijevovojni). Tip vijka je V-519/PT, promjera 1200 mm, sačinjen od tri krila nepromjenljiva uspona.

### 3 DIZELSKI MOTOR KAO GLAVNI DIO PROPULZIJSKOG SUSTAVA

Složenost brodskog porivnog sustava određena je namjenom broda odnosno tipom porivnog motora. Neprekidnim usložavanjem operativnih zahtjeva uporabe ratnih brodova povećava se snaga porivnih motora, mijenjaju se dimenzije i stupanj automatiziranosti. Za brodske porivne motore najčešće se koriste dizelski motori. Brodski dizelski motori moraju zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- siguran rad u intervalu od 30 % do 100 % od nominalne brzine vrtnje,
- mogućnost starta motora u toplom i u hladnom stanju,
- mogućnost sigurnog i lakog prekretanja (naprijed-nazad).

#### Dizelski motor

Dizelski motor je toplinski sustav s unutarnjim sagorijevanjem goriva, koji pretvara potencijalnu energiju sadržanu u gorivu u mehanički rad. Ideja dizelskog motora nastala je kao odgovor na zahtjeve za motorom koji bi imao veći koeficijent korisnog rada od parnog stapnog stroja, a ujedno trošio i manje količine goriva [1], [2], [34].

Dizelski motor patentirao je Rudolf Diesel u veljači 1892. godine u Njemačkoj. On je razvio ideju i teorijski princip rada ove vrste motora: tlačenje zraka u cilindru s posljedicom značajnog porasta temperature, nakon čega se u stlačeni zrak ubacuje gorivo koje se odmah i pali zbog visoke temperature. Paljenje goriva izaziva kretanje klipa prema dolje i tako se ostvaruje koristan rad, koji se periodično ponavlja.

#### Podjela dizelskih motora

Danas u praksi postoji niz kriterija za podjelu dizelskih motora, a osnovni su:

- prema broju taktova – dvotaktni i četverotaktni,
- prema broju cilindara – jednocilindrični i višecilindrični,
- prema izvedbi – redni ili linijski, „V“ motori, „delta“ motori, radijalni motori,
- prema brzini vrtnje – sporookretni, srednjeokretni i brzookretni motori,
- prema namjeni – za kopnenu namjenu, brodski motori itd.

Brzina vrtnje danas je najčešći kriterij podjele dizelskih motora, stoga razlikujemo:

- sporookretne motore (brzina vrtnje od 60 do 200  $\text{min}^{-1}$ ),
- motore srednje brzine vrtnje (brzina vrtnje od 300 do 1000  $\text{min}^{-1}$ ),
- brzookretne (brzina vrtnje od 1000 do 2000  $\text{min}^{-1}$  i više).

Brzookretni motori i motori srednje brzine vrtnje najčešće su četverotaktni. Motori srednje brzine vrtnje dimenzijama su veći od brzookretnih i mogu koristiti teže gorivo za svoj rad. Sporookretni motori najčešće su dvotaktni.

Zbog manjih brzina rotacije radilice sporookretnih i motora srednje brzine vrtnje, ovi motori imaju „više vremena“ za potpunije sagorijevanje pa mogu koristiti teža dizelska goriva.

#### Sporookretni dizelski motori

Tradicionalni, sporookretni dizelski motori (prvi proizvedeni dizelski motori imali su brzine vrtnje od 60 do 200  $\text{min}^{-1}$ ) najveći su dizelski motori koji se koriste uglavnom u pomorstvenoj verziji odnosno za pogon brodova, mada ima slučajeva u kojim se koriste za pogon velikih generatora električne struje. Uglavnom su dvotaktni, ekstremno velikih dimenzija, visine do 15 metara i težine do 1800 tona. Uobičajeno imaju direktno ubrizgavanje teškog dizelskoga goriva velikog viskoziteta, koje se mora predgrijavati za svaku manipulaciju na brodu. Kao brodski pogonski strojevi, s osovnom vijka su povezani direktno, bez spojke i reduktora, jer vijci na ovim brzinama vrtnje nisu podložni kavitaciji pa brzinu vrtnje motora ne treba smanjivati. Zato se za vožnju broda „krmom“ motor zaustavlja i ponovo upućuje s rotacijom u suprotnom smjeru, što se postiže preko drugog seta bregastih osovinica, ili brod mora biti opremljen vijkom sa zakretnim krilima.

#### Motori srednje brzine vrtnje

Motori s brzinom vrtnje od 300 do 1000  $\text{min}^{-1}$  koriste se za pogon brodova, velikih električnih generatora i velikih mehaničkih postrojenja kao što su velike pumpe i kompresori u industrijskim postrojenjima. Za rad koriste obično ili teško dizelsko gorivo s direktnim ubrizgavanjem u cilindre.

Srednjeokretni motori često se proizvode u varijantama koje koriste prirodni plin kao gorivo, pa u tom slučaju postaju slični benzinskim motorima. Izrađuju se i takvi motori koji mogu koristiti kombinaciju goriva – dizelsko gorivo/prirodni plin.

#### Brzookretni motori

Brzookretni dizelski motori ugrađuju se u brodove, jahte, zrakoplove, teške kamione, autobuse, traktore, automobile; koriste se za pogon kompresora, pumpi i manjih dizel-električnih generatora. Najveći broj brzookretnih motora ima indirektno ubrizgavanje, kako bi se ubrzalo miješanje zraka i ubrizganoga goriva i time postiglo bolje sagorijevanje goriva. Danas se najveći broj dizelskih motora proizvodi upravo kao brzookretni motori.

#### Primjena dizelskih motora za pogon brodova

Odmah nakon što su uočene značajne prednosti dizelskih motora u odnosu na dotadašnje brodske propulzijske sustave (vjetar, parni stroj i turbina), sve najznačajnije pomorske sile, vlasnici ratnih i trgovačkih mornarica u svijetu, počeli su s eksperimentima primjene dizelskih motora za pogon svih vrsta brodova.

Za širu primjenu u mornarici, bilo je potrebno razviti dizelski motor dovoljne snage za siguran poriv broda. Tako je 1935. godine proizveden prvi četverotaktni dizelski motor na teško gorivo, a 1952. godine i prvi veliki dvotaktni motor, koji je mogao biti ugrađen kao brodski porivni motor.

Zahtjevi za točno određenim karakteristikama dizelskih motora značajno se razlikuju za ratne i trgovačke brodove. Na brodovima trgovačke mornarice istaknut je zahtjev ekonomičnosti, posebno na pitanju potrošnje goriva, stoga je motor većih dimenzija. Za ratni brod važnije su manje dimenzije, a veća snaga dizelskog motora, uslijed potrebe za boljim pomorstvenim osobinama broda i većom brzinom broda. Zbog toga se na trgovačkim brodovima najčešće ugrađuju motori srednjeg broja okretaja i sporohodni motori, a na ratnim brodovima brzookretni motori s prednabijanjem zraka, koji imaju znatno povoljniji odnos snage i težine motora. Radijalni brzookretni brodski dizelski motor istaknut je primjer propulzijskog motora na ratnim brodovima koji zadovoljava zahtjevne izazove propulzijskog sustava brodova specijalne namjene.

### 3.1 Brzookretni radijalni dizelski motor

Radijalni ili „zvijezda“ motor je motor s unutarnjim sagorijevanjem u kojem su cilindri postavljeni simetrično od centralnog koljenastog vratila prema periferiji [33]. U radijalnim motorima klipovi su povezani koljenastim vratilom preko glavne i skupa sekundarnih klipnjača. Jedan klip, obično gornji, ima glavnu klipnjaču direktno povezanu s koljenastim vratilom, dok su klipnjače ostalih klipova povezane u krug na rub glavne klipnjače (slika 3.1). Navedeno se odnosi na jedan red ili blok, kojih u motoru obično ima više, ovisno o veličini motora.



Slika 3.1 Sklop-klipnjača brzookretnog radijalnog dizelskog motora

Četverotaktni radijalni motori imaju neparan broj cilindara u bloku radi mirnijeg rada i pravilnog reda paljenja smjese u cilindrima. Koljenasto vratilo u jednom ciklusu napravi puna dva kruga da bi se završila sva četiri takta (usis, kompresija, ekspanzija i ispuh), to znači red paljenja 1, 3, 5, 2, 4. Na taj način uvijek su dva cilindra „razmaka“ između cilindara kod kojih je u tijeku takt ekspanzije, a to omogućuje miran rad radijalnog motora bez značajnih vibracija.

#### Povijest i razvoj radijalnog motora

Charles Manly je 1901. godine konstruirao prvi 5-cilindarski radijalni motor, hlađen vodom, za jednu od prvih letjelica osobne konstrukcije. Snaga ovog motora bila je 39 kW na 950 okretaja u minuti. Nekoliko godina kasnije Jacob Ellehammer izradio je prvi radijalni motor hlađen zrakom. Bio je to 3-cilindarski motor temeljem kojeg je 1907. godine razvio napredniji 5-cilindarski model i ugradio ga u svoju letjelicu kojom je uspio napraviti seriju kratkih „skokova“, ali ne i poletjeti. Dvije godine kasnije Ellehammer je razvio još jedan motor sa šest cilindara u dva 3-cilindrična bloka. Ovaj motor imao je vrlo dobar odnos snage i težine, ali i dalje nije imao posebnu uporabnu vrijednost, posebno ne za pogon zrakoplova. Još jedan od ranih pokušaja izrade ovakve konfiguracije motora bio je 3-cilindrični Anzani, koji je pokretao Louis Blériotov „Blériot XI“ u letu preko kanala La Manche 25. 7. 1909. godine. Tijekom 1914. godine Anzani je razvio svoj najveći radijalni motor, 20-cilindarski s četiri bloka po pet cilindara, snage 150 kW. Tijekom Prvog svjetskog rata mnogi saveznički avioni bili su pokretani Bentley, Clerget, Gnome i Le Rhone radijalnim motorima, od kojih je najsnažniji imao 180 kW. Tijekom rata i Nijemci su uspjeli razviti radijalni motor, Siemensov 11-cilindrični radijalni motor.

Potencijalne prednosti zrakom hlađenih radijalnih motora u odnosu na vodom hlađene redne ili linijske jasno su uočene do 1918. godine. Mornarica SAD-a 1921. godine objavila je da će za popunu nosača zrakoplovima naručiti isključivo zrakoplove sa zrakom hlađenim radijalnim motorima zbog boljeg odnosa snage i težine. Charles Lawrance, kojeg je financirala mornarica SAD-a, 1922. godine razvija radijalni motor s aluminijskim cilindrima s čeličnim košuljicama. Time se produljuje resurs motora na 300 sati rada, nasuprot dotadašnjih prosječnih 50 radnih sati po motoru kod vodom hlađenih rednih motora. Daljnjim razvojem radijalnih motora motor kompanije Wright Aeronautical Corporation s oznakom J-5 „Whirlwind“ od 168 kW iz 1925. godine postaje poznat kao prvi stvarno pouzdan avionski motor. Ovaj motor bio je ugrađen i u „Ryan NYP“, avion kojim je Charles Lindbergh izveo prvi samostalni let preko Atlantika.

Radijalni motori do kraja 1929. godine gotovo su potpuno istisnuli redne vodom hlađene motore kao pogonske agregate za zrakoplovstvo.

Rolls Royce je svojim modelom „Merlin“ iz 1933. godine, koji je ugrađivan u Spitfire, Hurricane i Lancaster Zrakoplove, samo učvrstio ovu činjenicu.

Sve do početka primjene mlaznih motora, bombarderi, transportni i putnički zrakoplovi najčešće su imali radijalne motore kao pogonske motore, zbog prednosti ove konfiguracije, od kojih su najznačajnije veći volumen motora, veća pouzdanost i jednostavnije održavanje. Radijalni motor imao je bolji odnos snage i težine i veću mehaničku efikasnost, odnosno bolji koeficijent korisnog rada i kraće koljenasto vratilo od rednih i manji broj ležaja koljenastog vratila. Kraće koljenasto vratilo imalo je manje vibracija i zbog toga veću pouzdanost. Osim toga, svi cilindri radijalnog motora bili su hlađeni jednako, u jednolikoj struji zraka, dok su u rednom motoru bili bolje hlađeni cilindri koji su bili bliže ulazu rashladne emulzije u motor.

Radijalni motori s više blokova

Prvi radijalni motori imali su jedan blok odnosno red cilindara, ali s povećanjem zahtijevane snage postalo je potrebno dodati još redova, blokova na jedan početni. Prvi poznati radijalni motor s više od jednog bloka bio je Gnome „Double Lambda“, motor s 14 cilindara u dva bloka ukupne snage 160 KS iz 1912. godine. Dugo radijalni motori nisu imali više od dva bloka, sve dok nije izgrađen Pratt & Whitney R-4360 „Wasp Major“ 28-cilindrični motor s četiri bloka, jedan od najvećih motora ove vrste. Korišten je u mnogim velikim zrakoplovima poslije Drugog svjetskog rata.

„Lycoming“ R-7755 bio je najveći klipni zrakoplovni motor ikada proizveden, s 36 cilindara ukupnog volumena oko 127 litara i snage od 3700 kW.

Radijalni motori koji su imali 56 cilindara i više razvijeni su u SSSR-u. Najveći ruski brodski motor ove vrste imao je 112 cilindara, ukupnog volumena od 383 litre i 7500 kW snage. Kod nas su ugrađivani brzookretni radijalni motori M 503 A2 na hidrokrilcima i brzim raketnim čamcima te brzookretni radijalni motori M 504 B2, koji se koriste kao pogonski motori na raketnim topovnjačama HRM-a. Na RTOP-11 i RTOP-12 ugrađena su po tri radijalna brzookretna brodska dizelska motora M 504 B2 (slika 3.2).



Slika 3.2 Brzookretni radijalni brodski dizelski motor M 504 B2

### 3.1.1 Opis brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2

Budući da se istraživanje u cilju izrade ove doktorske disertacije provodilo na brzookretnim radijalnim dizelskim motorima M 504 B2, u ovom potpoglavlju dati su opis i glavne karakteristike navedenih motora.

#### 3.1.1.1 Opis motora M 504 B2

Brzookretni radijalni brodski dizelski motor je višecilindrični, radijalni motor s vodenim hlađenjem i turbokompresorom. Nakon ostvarenog ciklusa motor je četverotaktni s direktnim ubrizgavanjem goriva, prednabijan s međuhlađenjem zraka. Motor se isporučuje u dvije varijante: desnokretni i lijevokretni, zavisno o smjeru okretanja izlazne osovine. Osnovna razlika lijevokretnog od desnokretnog motora je u reduktoru. U reduktoru lijevokretnog motora umetnut je jedan međuzupčanik radi dobivanja suprotnog smjera okretanja izlazne osovine. Smjer okretanja motora definiran je gledajući sa strane izlazne osovine spojke. U desnokretnom motoru izlazna osovina okreće se u smjeru kazaljke na satu, a u lijevokretnom u suprotnom smjeru okretanja kazaljke na satu. Ljevokretni motor razlikuje se od desnokretnog i po položaju pumpe morske vode, položaju boca sa zrakom pod tlakom koje služe za upravljanje preketom spojke i sustavom oduška. Pumpa morske vode, gledano sa strane preketne spojke, na lijevokretnom motoru smještena je na desnoj strani kao i boce punjene dušikom za upravljanje spojkom. Sklop za odzračivanje smješten je na suprotnoj strani. U desnokretnom motoru ovi sklopovi su zrcalno smješteni u odnosu na njihov položaj na lijevokretnom motoru [54], [60].

Motor M 504 B2 ima 56 cilindara u sedam blokova smještenih zvjezdasto. U svakom bloku je po osam cilindara. Kut između blokova motora je  $51^{\circ}25'43''$ . Jedan blok, gornji, postavljen je vertikalno.

Cilindarski blok s cilindarskom glavom odliven je od aluminijske legure. U blok se utiskuju čelične cilindarske košuljice, koje se u donjem dijelu bloka brtve gumenim prstenima. Cilindarski blokovi pričvršćeni su za kućište motora usadnim vijcima koji su pričvršćeni u sekcije kućišta.

Kućište motora sastoji se od devet čeličnih sekcija, koje su međusobno spojene vijcima. Koljenasto vratilo ima osam rukavaca. Rukavci su međusobno povezani ramenima, koja su istovremeno i oslonci koljenastog vratila. Koljenasto vratilo motora je oslonjeno u kućištu motora na devet valjkastih ležajeva. Jedan ležaj ograničava pomicanje osovina u aksijalnom smjeru.

Sklop klipnjača svake sedmocilindrične zvijezde sastoji se od glavne i šest priključnih klipnjača. Priključne klipnjače spojene su s glavnom pomoću osovinica utisnutih u provrte glavne klipnjače.

Klipovi su iskovani od aluminijske legure. Svaki klip glavne klipnjače ima dva čelična kompresijska prstena i dva uljna prstena od lijevanog željeza. Klip priključne klipnjače ima dodatni čelični uljni prsten. Osovinice klipa slobodno su uložene.

U cilindričnoj glavi, za svaki cilindar, smještena su po dva usisna i dva ispušna ventila. Ventili dobivaju pogon od razvodne osovine preko klackalica smještenih u gornjem dijelu kućišta blok-pumpe. Razvodnu osovinu pogoni koljenasto vratilo motora preko zupčanog prijenosa i međuosovine.

Ispušni plinovi iz svakog bloka skupljaju se u ispušnom kolektoru, a od tuda preko ispušnog ventila u turbokompresor. Ispušni kolektor hladi se vodom.

Turbokompresor je smješten na prednjem dijelu motora u produžetku njegove osi simetrije. Namjena mu je povećanje zapreminske snage motora, iskorištavajući za pokretanje energiju ispušnih plinova.

Turbokompresor se sastoji od jednostupanjskog centrifugalnog puhala i jednostupanjske aksijalne plinske turbine, smještenih na zajedničkoj osovini. Rotor turbokompresora je preko dvostupanjskog zupčanog prijenosa i hidraulične spojke vezan s koljenastim vratilom motora. Smjerovi okretanja koljenastog vratila motora i rotora turbokompresora su isti. Kompresor neposredno usisava zrak iz prostora strojarnice kroz četiri usisa na kojima su na cijevima uvodnika postavljeni prigušivači buke.

Poslije izlaska iz turbokompresora stlačeni zrak hladi se morskom vodom u rashladniku, a zatim vodi cjevovodima na ulazne otvore blokova dizelskog motora.

Na prednjem dijelu kućišta motora pričvršćen je prijenosnik u kojem je zupčani prijenos za pogon razvodnih osovina, mehanizam za promjenu kuta ubrizgavanja goriva i kolektor rashladne vode motora.

Dvije pumpe centrifugalnog tipa za slatku vodu smještene su na kućištu turbokompresora. Pumpe dopremaju vodu u kolektor prijenosnika, odakle se voda razvodi prema svakom cilindarskom bloku. Uzduž donjeg dijela bloka nalazi se kolektor vode iz kojeg rashladna voda ulazi u svaki cilindar. Iz blokova voda odlazi u rashladne prostore kolektora ispušnih plinova, zatim kroz rashladne prostore ispušnih koljena i kućišta turbine ide u rashladni prostor sakupljača plinova. Iz sakupljača plinova rashladna voda odvodi se u brodski rashladnik gdje se hladi morskom vodom.

Elementi opskrbe gorivom dizelskog motora su: grubi mrežasti filter goriva, dobavna pumpa, fini mrežasti dvostruki filter goriva, pumpa visokog tlaka i ubrizgač.

Visokotlačne pumpe goriva izrađene su kao jednoklipne pumpe. Visokotlačne pumpe goriva pričvršćuju se na kućištu blok-pumpi zajedničkom za svih osam cilindara svakog bloka. Ubrižgači su zatvorenog tipa. Ugrađeni su u glavu cilindra koso u odnosu na os cilindra. Pumpama za ubrizgavanje upravlja se regulatorom preko sustava poluga i centralnim mehanizmom u prijenosniku. Sverežimski regulator brzine vrtnje motora je na kućištu pogona agregata.

Dizelski motor ima prekretnu spojku koja omogućuje prenošenje brzine vrtnje s koljenastog vratila motora na osovinski vod preko reduktora na vijak bez promjene smjera okretanja. Prekretna spojka omogućava: hod naprijed (prijenos okretaja s koljenastog vratila motora preko reduktora na osovinski vod bez promjene smjera okretanja), prazan hod (isključenje osovinskog voda od motora) i hod krmom (prijenos okretaja s koljenastog vratila motora preko reduktora na osovinski vod s promijenjenim smjerom okretanja). Smjer okretanja koljenastog vratila motora pri tome ostaje nepromijenjen.

Mehanizam prekretna spojke smješten je u lijevanom aluminijskom kućištu, koje je pričvršćeno na zadnji dio kućišta motora. Okretanje s koljenastog vratila motora na osovinu spojke za hod naprijed uključuje se i prenosi kandžastom spojkom uz prethodnu sinkronizaciju okretanja osovine spojke i koljenastog vratila motora pomoću konusne tarne spojke.

Za hod krmom okretanje se prenosi preko planetarnog prijenosa sa zupčanicima.

Jednostupanjski reduktor, koji prenosi okretanje s ulazne osovine spojke na izlaznu osovina reduktora, pričvršćen je na kućište spojke. Reduktor ima odzivne ležajeve koji na sebe preuzimaju aksijalnu silu vijaka.

Motor se pričvršćuje na postolje u brodu preko četiri stope. Dvije krmene su glavni oslonci, a smještene su na kućištu prekretno spojke. Izvedene su u obliku rukavca s gumenim amortizerima. Druge dvije stope, pramčane, služe za oslanjanje i izrađuju se u dvije varijante: s amortizerima ili bez njih. Pramčane stope međusobno su spojene sustavom polužja. Polužni sustav pramčanih stopa ima gumeni amortizer i pričvršćen je na dva donja bloka motora sa strane turbopuhala.

Elementi podmazivanja dizelskog motora su: potrošni tank ulja, tlačne pumpe, filter ulja i glavne uljne sabirnice motora. Ulje se iz motora odvodi u slivni kolektor kućišta prekretno spojke. Odatle se crpi usisnom pumpom te kroz posebni filter i rashladnik prebacuje u potrošni tank.

### 3.1.1.2 Osnovni dijelovi i karakteristike motora M 504 B2

Prema tehničkom opisu proizvođača [55], [60] brzookretni radijalni brodski dizelski motor sastoji se od osnovnih dijelova, sklopova i agregata: dobavne pumpe ulja, reduktora, prekretno spojke, cjevovoda goriva, cilindarskih blokova, klipne grupe, sklopa klipnjača, koljenaste osovine, blok-pumpe goriva, razvodnog mehanizma, sustava za upravljanje blok-pumpama goriva, odušnih cijevi, regulatora brzine vrtnje s pogonom, ispušnog voda, prigušivača buke, turbopuhala, provodnika zraka, agregatnog sklopa, prijenosnika, pumpe za izbacivanje ulja iz blokova, kućišta, pogona agregata, pumpe za izbacivanje ulja iz motora, ubrizgača goriva, pumpi visokog tlaka za gorivo, pumpe slatke vode, sklopova sustava za upućivanje motora, pričvršćenja motora i pumpe morske vode.

Ugrađeni brzookretni radijalni dizelski motori M 504 B2 imaju sljedeće karakteristike:

- broj cilindara .....56,
- broj blokova .....7,
- volumen cilindara ( $l$ ) .....196,1,
- stupanj kompresije ..... $13 \pm 0,5$ ,
- smjer okretanja koljenastog vratila..... lijevi sa strane reduktora,
- maksimalna snaga motora  $kW$  / brzina vrtnje  $min^{-1}$  .....3676/2000,
- eksploatacijska snaga  $kW$  / brzina vrtnje  $min^{-1}$  .....2940/1800 – 1325/1200,
- snaga na praznom hodu  $kW$  / brzina vrtnje  $min^{-1}$  .....150/750,
- snaga pri hodu krmom  $kW$  / brzina vrtnje  $min^{-1}$  .....514/750,

- ambijentalni uvjeti:
  - o temperatura zraka na usisu  $^{\circ}\text{C}$ .....20,
  - o atmosferski tlak  $\text{hPa}$ .....1013,
  - o relativna vlažnost zraka %.....70,
- ogrjevna moć goriva  $\text{kJ/kg}$  .....42697,
- specifična potrošnja goriva  $\text{g/kWh}$  pri maksimalnoj snazi kod 2000  $\text{min}^{-1}$ .....224,
- specifična potrošnja goriva  $\text{g/kWh}$  pri 1200 do 1700  $\text{min}^{-1}$ .....203 – 215,
- protutlak ispuha  $\text{kPa}$ .....11, 33,
- promjer cilindra  $\text{mm}$ .....160,
- hod klipa  $\text{mm}$ , cca.....170 (ovisno o blokovima),
- prijenosni omjer reduktora:
  - o naprijed.....0,514,
  - o krmom.....0,412,
- dimenzije dizelskog motora:
  - o duljina  $\text{mm}$ .....4400,
  - o širina  $\text{mm}$ .....1645,
  - o visina  $\text{mm}$ .....1640,
- trajni uzdužni nagib  $^{\circ}$ .....15,
- kratkotrajni uzdužni nagib  $^{\circ}$ .....20,
- trajni bočni nagib  $^{\circ}$ .....15,
- kratkotrajni bočni nagib  $^{\circ}$ .....45,
- udarna otpornost:
  - o u vertikalnoj ravnini ( $g$ ).....20,
  - o u horizontalnoj ravnini ( $g$ ).....10,
- masa suhog motora s spojkom i reduktorom  $\text{kg}$ :
  - o desnokretni.....7150,
  - o lijevokretni.....7200,
- masa vode u motoru  $\text{kg}$ .....280,
- masa ulja u motoru  $\text{kg}$ .....70.

Svaki dizelski motor ima svoj nezavisni vodom hlađeni ispušni vod, koji se sastoji od kompenzatora i cijevi s dvostrukim stjenkama, ispušnog lonca te oplatnog nadvodnog i

podvodnog izlaza. Ispušni cjevovod lijevog i srednjeg dizelskog motora izlaze na lijevi, a desnog na desni bok broda.

Ispušna cijev s koljenom se jednim krajem oslanja na ispušni lonac, a drugim na brodsku konstrukciju preko elastičnog ovjesa. Na taj način se ne prenosi težina ispušnog voda na priрубnicu ispuha dizelskog motora čije je opterećenje ograničeno.

Ispušni lonac je ekspanzijsko-apsorpcijskog tipa, izveden je kao dvodijelan, s vodom hlađenim gornjim dijelom, s mogućim zakretanjem gornjeg dijela u odnosu na donji čime se omogućuje ugradnja u bilo kojoj strojarnici. Nadvodni oplatni priključak je bez zaklopke, dok podvodni ima zaklopku. Zaklopka je stalno otvorena, osim u režimima do tisuću okretaja.

Zaklopkom upravlja pneumatski cilindar upravljani daljinski s pulta u kontrolnoj kabini i ručno sa zaklopke. Maksimalni pad tlaka u ispušnom vodu ne smije biti veći od 11,33 kPa.

### **3.1.1.3 Sustav upravljanja, nadzora i zaštite motora M 504 B2**

Na obje raketne topovnjače sustav upravljanja je pneumatski. Na RTOP-11 sustavi nadzora, signalizacije i alarma izvedeni su u analognoj tehnologiji, dok su na RTOP-12 izvedeni u mikroprocesorskoj tehnologiji digitalnog tipa s dijelom analognih komponenti. Sustav zaštite je identičan na oba broda.

Upravljanje glavnim dizelskim motorima omogućeno je iz kormilarnice, kontrolne kabine i iz strojarnice. U kormilarnici i kontrolnoj kabini nalazi se pult upravljanja propulzijom, a u strojarnicama lokalne ploče smještene su pored dizelskih motora.

Na pultu u kormilarnici smještene su tri upravljačke ručice, za svaki dizelski motor po jedna. Pomoću ručica upravlja se brzinom vrtnje dizelskih motora i preketom reduktora u tri položaja: „NAPRIJED“, „KRMOM“ i „STOJ“. Izbor mjesta upravljanja provodi se u kontrolnoj kabini za kormilarnicu i kontrolnu kabinu, a na lokalnim pločama preuzima se mehaničko upravljanje spojkama.

Signalizacija položaja spojke izvedena je na pultovima u kormilarnici i kontrolnoj kabini. U slučaju kvara pneumatskog sustava za daljinsko upravljanje prelazi se na lokalno mehaničko upravljanje.

S pulta propulzije u kontrolnoj kabini omogućeno je upravljanje:

- ventilima za preket dizelskih motora,
- ventilima za upućivanje dizelskih motora,
- pumpom predpodmazivanja,
- pumpom za ispušavanje ulja iz kartera spojke.

Nadzor stanja propulzijskog postrojenja provodi se s pultova u kormilarnici i kontrolnoj kabini te s lokalnih ploča u strojarnicama.

Najdetaljniji nadzor parametara dizelskih motora omogućen je s pulta u kontrolnoj kabini. Pult je opremljen mjernim instrumentima, svjetlosno-zvučnom signalizacijom i elementima za upravljanje.

Svi elementi poredani su u panele za svaki dizelski motor. Sustav nadzora omogućava mjerenje:

- tlaka ulja, morske vode, goriva, emulzije, stlačenog zraka,
- temperature ulja, emulzije, ispušnih plinova,
- brzine vrtnje motora.

Sustav nadzora i zaštite uključuje sljedeću svjetlosno-zvučnu signalizaciju opasnih stanja:

- temperatura niska (emulzije, ulja),
- tlak nizak (ulja, emulzije),
- razina niska (ulja, emulzije, goriva u potrošnim tankovima).

Dizelski motori se automatski zaustavljaju kada nastupe sljedeći uvjeti:

- previsoka brzina vrtnje,
- nizak tlak ulja u glavnoj sabirnici,
- nadtlak ulja u spojci motora.

Elementi zaštite ugrađeni su u lokalnoj ploči iz koje direktno djeluju na sustav obustavljanja dizelskog motora, tj. na stop-ventil goriva u agregatnom sklopu motora.

Sustav nadzora dizelskih motora na pločama lokalnog upravljanja izveden je za nadzor osnovnih parametara iz strojarnica, što predstavlja pričuvno mjesto upravljanja u odnosu na kontrolnu kabinu i kormilarnicu. Ploča je za svaki dizelski motor opremljena mehaničkim instrumentima za praćenje sljedećih parametara:

- tlaka (zraka u spojci, ulja u glavnoj sabirnici te u ležajima turbine ispred i iza filtera, emulzije i morske vode),
- temperature ulja i emulzije,
- brzine vrtnje.

S priključka na dizelskom motoru signal tlaka ulja u glavnoj sabirnici, tlaka ulja u ležaju turbine, tlaka ulja ispred i iza filtra vodi se na lokalnu ploču i na pult upravljanja i nadzora u kontrolnu kabinu. Na pult u kontrolnu kabinu vodi se električni signal s davatelja tlaka koji je smješten u neposrednoj blizini dizelskog motora.

### 3.1.2 Brodska evidencija eksploatacije motora M 504 B2

Brodsku evidenciju čini skup svih podataka (relevantna baza podataka) u koju se upisuju sljedeći podaci: sati rada motora, izvršene intervencije i postupci održavanja, podaci o nastalim kvarovima, planski zahvati, dostupnost pričuvnih dijelova, posjedovanje specijalnih alata itd. Bazu podataka u konkretnom istraživanju čine podaci koji su upisani u sljedeće brodske dokumente [51], [55], [56], [60], [61]:

- tehnička knjižica dizelskog motora,
- dnevnik stroja za brodove HRM-a,
- knjiga remontnih radova,
- knjiga kvarova.

Na slici 3.3 prikazani su prije spomenuti brodski dokumenti za evidenciju stanja eksploatacije brzookretnog radijalnog broskog dizelskog motora na raketnim topovnjačama.



Slika 3.3 Dokumenti za evidenciju stanja eksploatacije brodskih motora

*Tehnička knjižica* je dokument koji služi za evidenciju tehničkog stanja i zaduženosti tvornim sredstvom, pripadnim kompletom, alatom i pričuvnim dijelovima. Tehnička knjižica vodi se za mornaričko-tehničko materijalno sredstvo, formira se prilikom „ulaska“ sredstva u Oružane snage i prati sredstvo do trenutka njegovog „izlaska“ iz sustava, a čine je 24 različita obrasca [61]. Nakon primanja materijalno-tehničkog sredstva, tehničku knjižicu ispunjava rukovatelj sredstva, a najznačajniji obrasci za konkretno praćenje eksploatacije broskog motora sadrže sljedeće podatke:

- opće podatke o motoru,
- pregled pogonskih sati rada motora,
- podatke o nadzoru, analizi i zamjeni ulja,

- podatke o preventivnom održavanju,
- evidenciju kvarova i obavljenih popravaka,
- pregled zamijenjenih dijelova,
- popis pričuvnih dijelova, alata i pribora.

Podaci o broju pogonskih sati rada motora upisuju se u odgovarajuću tablicu, a primjer takve tablice prikazan je u nastavku (tablica 3.1).

Tablica 3.1 Pregled pogonskih sati rada brodskog motora

| <b>PREGLED POGONSKIH SATI</b> |        |  |  |  |  |  |
|-------------------------------|--------|--|--|--|--|--|
| Mjesec                        | Godina |  |  |  |  |  |
|                               |        |  |  |  |  |  |
| Siječanj                      |        |  |  |  |  |  |
| Veljača                       |        |  |  |  |  |  |
| Ožujak                        |        |  |  |  |  |  |
| Travanj                       |        |  |  |  |  |  |
| Svibanj                       |        |  |  |  |  |  |
| Lipanj                        |        |  |  |  |  |  |
| Srpanj                        |        |  |  |  |  |  |
| Kolovoz                       |        |  |  |  |  |  |
| Rujan                         |        |  |  |  |  |  |
| Listopad                      |        |  |  |  |  |  |
| Studen                        |        |  |  |  |  |  |
| Prosinac                      |        |  |  |  |  |  |
| Svega u godini                |        |  |  |  |  |  |
| Od posljednjeg remonta        |        |  |  |  |  |  |
| Od početka uporabe            |        |  |  |  |  |  |

Dnevnik stroja za brodove HRM-a predstavlja osnovni brodski operativni dokument za praćenje rada, evidenciju stanja i nadzor porivnog sustava na brodovima HRM-a [51].

Dnevnik stroja je ostraničen, ovjeren dokument i zaveden u odgovarajuće registre. Dnevnik stroja se vodi za svako upućivanje i pogon glavnih motora, bez obzira na razloge upućivanja ili broja motora u pogonu. Slično kao i u slučaju tehničke knjižice, podaci se upisuju u odgovarajuće obrasce od kojih se posebno ističu tri obrasca (1, 6 i 7), koji će pobliže biti pojašnjeni u nastavku navođenjem kategorije podataka koje u obrasce unosi ovlaštena osoba.

U *Obrazac broj 1* upisuju se sljedeći podaci:

- vrijeme upućivanja, promjena režima rada i zaustavljanje rada motora,
- hod motora – naprijed, krmom i manevar<sup>11</sup>,
- podaci očitavanja s instrumenata (brzine vrtnje motora, pritisci ulja, goriva, vode, ulazne i izlazne temperature ulja, vode, ispuha i ostali podaci bitni za rad motora),
- vrijeme rada motora u pojedinim režimima odnosno kojom brzine vrtnje,
- zbroj pogonskih sati motora od ugradnje, od velikog remonta i posljednje zamjene ulja,
- utrošak pogonskih sredstava, uzimajući u obzir i rad pomoćnih motora,
- dužnost, ime, prezime i čin odgovornih osoba u službi koje unose podatke u dnevnik,
- opažanja o stanju sustava propulzije, primijećene neispravnosti, podaci o obavljenim radovima i mjerenjima u sklopu preventivnog održavanja, evidencije stanja pri dnevnim i tjednim pregledima i sl.

U *Obrazac broj 6* upisuju se sljedeći podaci:

- godišnji plan pregleda i remonta strojeva i uređaja na osnovi njihovih zasebnih tehničkih uputa,
- tjedni, mjesečni, tromjesečni i godišnji pregledi, te izvanredni pregledi, periodika dokovanja i remonta.

U *Obrazac broj 7* upisuju se sljedeći podaci:

- kratak opis obavljenih pregleda i radova iz planova opisanih u *Obrascu broj 6*,
- podaci iz *Obrasca broj 6* detaljnije se unose u tehničke knjižice ili kartone odgovarajućih sustava i podsustava.

Podaci i informacije dobiveni nakon izvršenih planiranih tjednih tehničkih pregleda (ili remonta) te podaci nakon pojave kvara i poduzete radnje na njihovom otklanjanju upisuju se u odgovarajuću tablicu (tablica 3.2), uz obvezatno evidentiranje:

---

<sup>11</sup> „Manevar“ je dio plovidbe broda u kojem se učestalo mijenja režim rada pogonskih motora (isplovljenje, uplovljenje, pozicioniranje i sl.).

Datuma izvršenog tjednog tehničkog pregleda; konstatacije o izvršenosti ili o neizvršenosti tjednog tehničkog pregleda; stanja tehničke ispravnosti cjelokupnog propulzijskog sustava i potpis odgovorne osobe.

Upravitelj stroja odgovoran je za ispravno, pravovremeno i uredno vođenje dnevnika stroja, provjerava unijete podatke i to ovjerava vlastoručnim potpisom. Zaključeni dnevnik stroja čuva se na brodu godinu dana, a zatim se arhivira u nadređenom zapovjedništvu na rok od pet godina.

Tablica 3.2 Opis izvršenih pregleda (remonta)

| OPIS IZVRŠENIH PREGLEDA – REMONTA                 |                                                                                                                                    |                 |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Datum, vrsta pregleda, remonta (mjesečni i drugi) | Naziv mehanizma, otkriveni nedostaci, zračnost, obavljeni radovi na otklanjanju nedostataka i potpis                               | Bilješka o radu |
| 2. 4. 2009.<br>Tjedni tehnički pregled            | Izvršen planirani tjedni tehnički pregled.<br>Glavni motori zračno prekrenuti.                                                     |                 |
|                                                   | Stanje pogonskog sustava ispravno.                                                                                                 | pfr Ivan Ivić   |
| 7. 6. 2005.                                       | Desni glavni motor:<br>VT pumpa goriva na cilindru 5A propušta gorivo na tlačnoj strani.                                           |                 |
|                                                   | Zbog nemogućnosti sanacije propuštanja izvršena je agregatna zamjena VT crpke.                                                     | pfr Ivan Ivić   |
| 16. 11. 2005.<br>Tjedni tehnički pregled          | Nije izvršen planirani tjedni tehnički pregled zbog angažiranja broda na provedbi zadaće nadzora državne granice na moru i ZERP-a. | pfr Ivan Ivić   |

Knjiga remontnih radova predstavlja jedinstveni dokument na brodu, a služi posadi broda za praćenje izvršenja planiranih i ugovorenih radova tijekom remonta broda te nadzora od strane povjerenstva naručitelja i za praćenje tijeka remonta i prijem broda [56]. Knjiga je usko povezana s ugovornim obvezama između naručitelja (MORH) i izvođača radova (remontna ustanova), a formira se na početku provedbe remonta broda i vodi se za vrijeme trajanja remonta do njegovog završetka (do potpisivanja Zapisnika između nadzornog povjerenstva naručitelja i izvođača radova).

Knjiga remontnih radova ovjerena je i zavedena u odgovarajuće registre. Unošenje podataka obavlja jedna ili više osoba koje zapovjednik broda ovlasti, a sve potrebne podatke treba unositi sažeto i jasno. Zaključena knjiga remontnih radova se čuva na brodu godinu dana, a poslije toga se dostavlja u nadređeno zapovjedništvo gdje se temeljem odobrenog zahtjeva pohranjuje.

Knjiga kvarova predstavlja jedinstveni dokument na brodu u kojem se navode sve bitne neispravnosti (kvarovi) brodskih sustava, podsustava, sklopova, podsustava i elemenata bez obzira na to radi se li o strojarstvu, energetici, elektronici, brodogradnji ili topničkom naoružanju [55]. Podaci se upisuju u odgovarajuću tablicu (tablica 3.3).

Tablica 3.3 Podaci o kvarovima na motoru (primjer)

|                   |                                    |                                                 |  |  |  |  |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|--|--|--|--|
| Napomena          |                                    | Sustav propulzije u operativnom stanju          |  |  |  |  |
| Popravak izvršen  | Ustanova / osoba                   | NCP Grupa                                       |  |  |  |  |
|                   | Datum                              | 17. 11. 2005.                                   |  |  |  |  |
| Kvar prijavljen   | čin, ime i prezime / način prijave | 10. 11. 2005. pbb Ivan Ivić pisana prijava      |  |  |  |  |
|                   | Datum                              | 10. 11. 2005.                                   |  |  |  |  |
| Opis kvara        |                                    | Propuštanje na kontrolnom otvoru crpke emulzije |  |  |  |  |
| Sredstvo / Sustav |                                    | Glavni motor M 504 B2                           |  |  |  |  |
| Datum             |                                    | 10. 11. 2005.                                   |  |  |  |  |
| Red. broj         |                                    | 1.                                              |  |  |  |  |

Evidencija kvara u knjizi kvarova (prema tablici 3.3) započinje upisivanjem rednog broja neispravnosti za tekuću godinu nakon čega se evidentira datum nastanka kvara i točno navodi sredstvo na kojem je došlo do kvara, čiji naziv se nadopunjuje tvorničkim brojem sredstva u kvaru.

Nastali kvar potrebno je ukratko pojasniti i evidentirati kome je informacija prenesena. Nakon otklanjanja kvara navodi se informacija tko je otklonio kvar i datum kada je sustav vraćen u ispravno stanje. Knjiga kvarova mora biti ovjerena i zavedena u odgovarajuće registre. Podatke unosi jedna ili više osoba koje je ovlastio zapovjednik broda. Sve tražene podatke potrebno je unositi sažeto i što jasnije kako bi se iz njih mogla precizno pratiti kronologija neispravnosti brodskih sustava. Ispunjena knjiga kvarova čuva se na brodu godinu dana, a istekom tog roka dostavlja se u nadređeno zapovjedništvo gdje se temeljem odobrenog zahtjeva pohranjuje.

### 3.1.3 Analiza uporabe motora M 504 B2 na ROTP-11 i RTOP-12

Na temelju podataka o eksploataciji motora M 504 B2, koji se nalaze u brodskim evidencijama RTOP-11 i RTOP-12, izrađena je tablica broja sati rada motora (tablica 3.4) u odnosu na ostvarene režime plovidbe, za cca 500 sati rada motora.

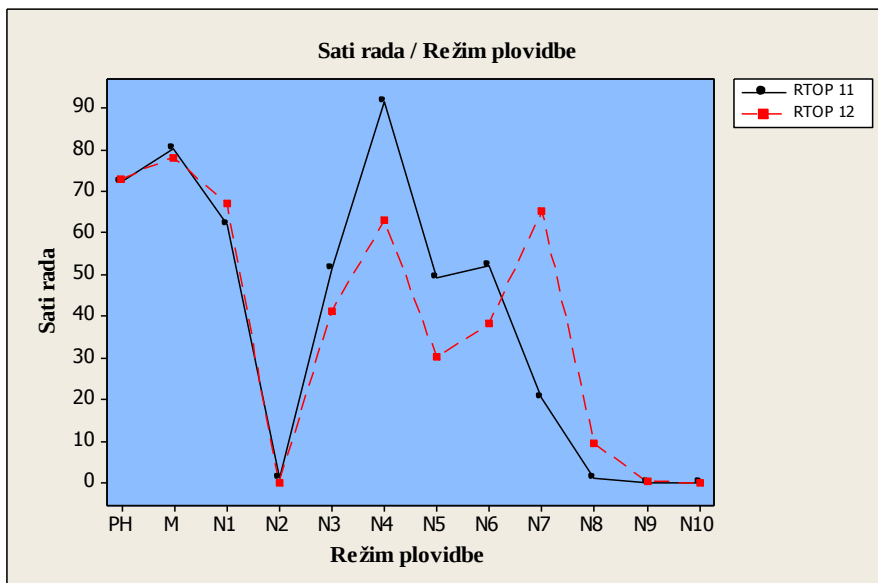
Tablica 3.4 Broj radnih sati motora prema režimima plovidbe

| M 504 B2         |              | RTOP-11         | RTOP-12         |
|------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| Režim plovidbe   | $[min^{-1}]$ | Sati rada $[h]$ | Sati rada $[h]$ |
| PH               | 750          | 72:15           | 73:10           |
| M                | 750          | 80:25           | 78:15           |
| N1               | 750          | 62:15           | 67:10           |
| N2               | 900          | 01:15           | 00:00           |
| N3               | 1000         | 51:35           | 41:30           |
| N4               | 1200         | 91:50           | 63:20           |
| N5               | 1400         | 49:35           | 30:10           |
| N6               | 1500         | 52:15           | 38:35           |
| N7               | 1700         | 20:35           | 65:20           |
| N8               | 1800         | 01:25           | 09:30           |
| N9               | 1900         | 00:05           | 00:30           |
| N10              | 2000         | 00:00           | 00:00           |
| Sati rada ukupno |              | 483:30          | 467:30          |

Gdje je:

- PH – prazan hod,
- M – manevar,
- N – naprijed.

Na temelju tablice 3.4 izrađen je dijagram intenziteta eksploatacije motora u odnosu na režime plovidbe, prikazan na slici 3.4.



Slika 3.4 Dijagram intenziteta eksploatacije motora M 504 B2

Slijedom tablice 3.4 i dijagrama (slika 3.4) izrađene su tablice 3.5 i 3.6 gdje su prikazana prosječna opterećenja istraživanih motora.

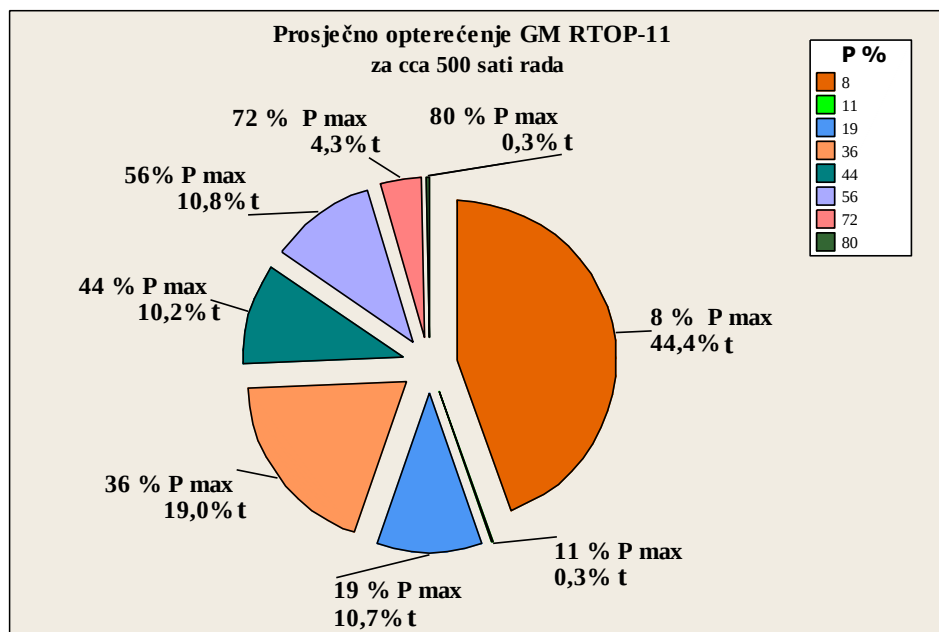
Tablica 3.5 Prosječno opterećenje motora M 504 B2 na RTOP-11

| PROSJEČNO OPTEREĆENJE MOTORA M 504 B2 NA RTOP-11 ZA<br>cca 500 SATI RADA |         |              |           |              |           |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Brzina<br>koljenastog vratila                                            | vrtanje | Snaga motora |           | Vrijeme rada |           |
|                                                                          |         | P [kW]       | $P_i$ [%] | [h]          | $t_i$ [%] |
| PH                                                                       | 750     | 295          | 8,00      | 72,25        | 14,94     |
| M                                                                        | 750     | 295          | 8,00      | 80,42        | 16,63     |
| N1                                                                       | 750     | 295          | 8,00      | 62,25        | 12,88     |
| N2                                                                       | 900     | 405          | 11,00     | 01,25        | 0,26      |
| N3                                                                       | 1000    | 700          | 19,00     | 51,58        | 10,67     |
| N4                                                                       | 1200    | 1325         | 36,00     | 91,83        | 18,99     |
| N5                                                                       | 1400    | 1620         | 44,00     | 49,58        | 10,25     |
| N6                                                                       | 1500    | 2060         | 56,00     | 52,25        | 10,81     |
| N7                                                                       | 1700    | 2650         | 72,00     | 20,58        | 4,26      |
| N8                                                                       | 1800    | 2950         | 80,00     | 01,42        | 0,29      |
| N9                                                                       | 1900    | 3270         | 89,00     | 00,08        | 0,02      |
| N10                                                                      | 2000    | 3680         | 100,00    | 00,00        | 0,00      |
| UKUPNO                                                                   |         |              |           | 483,49       | 100,00    |

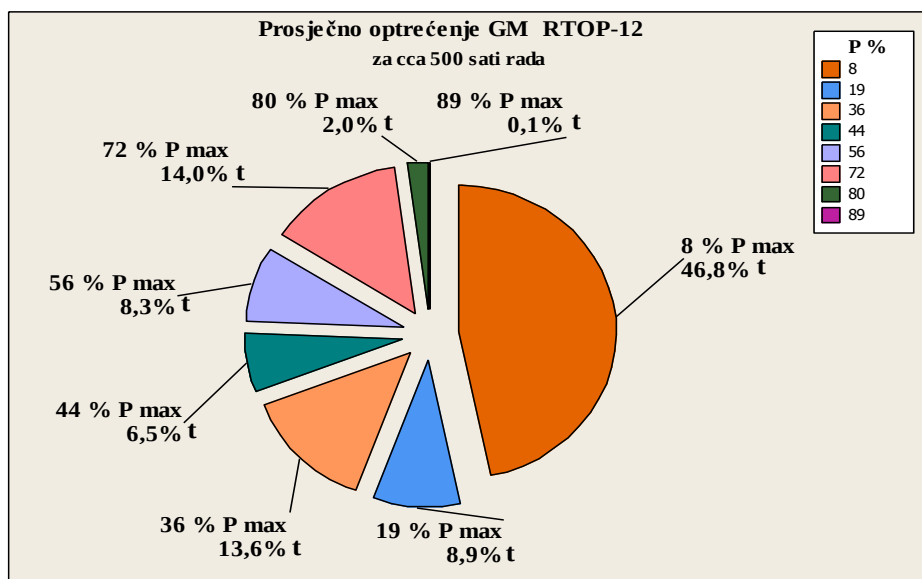
Tablica 3.6 Prosječno opterećenje motora M 504 B2 na RTOP-12

| PROSJEČNO OPTEREĆENJE MOTORA M 504 B2 NA RTOP-12 ZA cca 500 SATI RADA |      |              |           |              |           |
|-----------------------------------------------------------------------|------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Brzina vrtnje koljenastog vratila                                     |      | Snaga motora |           | Vrijeme rada |           |
|                                                                       |      | P [kW]       | $P_i$ [%] | [h]          | $t_i$ [%] |
| PH                                                                    | 750  | 295          | 8,00      | 73,17        | 15,65     |
| M                                                                     | 750  | 295          | 8,00      | 78,25        | 16,74     |
| N1                                                                    | 750  | 295          | 8,00      | 67,17        | 14,37     |
| N2                                                                    | 900  | 405          | 11,00     | 00,00        | 0,00      |
| N3                                                                    | 1000 | 700          | 19,00     | 41,50        | 8,88      |
| N4                                                                    | 1200 | 1325         | 36,00     | 63,33        | 13,55     |
| N5                                                                    | 1400 | 1620         | 44,00     | 30,17        | 6,45      |
| N6                                                                    | 1500 | 2060         | 56,00     | 38,58        | 8,25      |
| N7                                                                    | 1700 | 2650         | 72,00     | 65,33        | 13,97     |
| N8                                                                    | 1800 | 2950         | 80,00     | 09,50        | 2,03      |
| N9                                                                    | 1900 | 3270         | 89,00     | 00,50        | 0,11      |
| N10                                                                   | 2000 | 3680         | 100,00    | 00,00        | 0,00      |
| UKUPNO                                                                |      |              |           | 467,50       | 100,00    |

Temeljem prije navedenih podataka u tablicama 3.6 i 3.7 izrađeni su dijagrami prosječnih opterećenja brzookretnih radijalnih dizelskih motora M 504 B2 kao glavnih motora (GM), ugrađenih na RTOP-11 i RTOP-12 (slike 3.5 i 3.6).



Slika 3.5 Prosječno opterećenje na RTOP-11



Slika 3.6 Prosječno opterećenje na RTOP-12

Na temelju podataka prikazanih u prethodnim tablicama i dijagramima može se zaključiti:

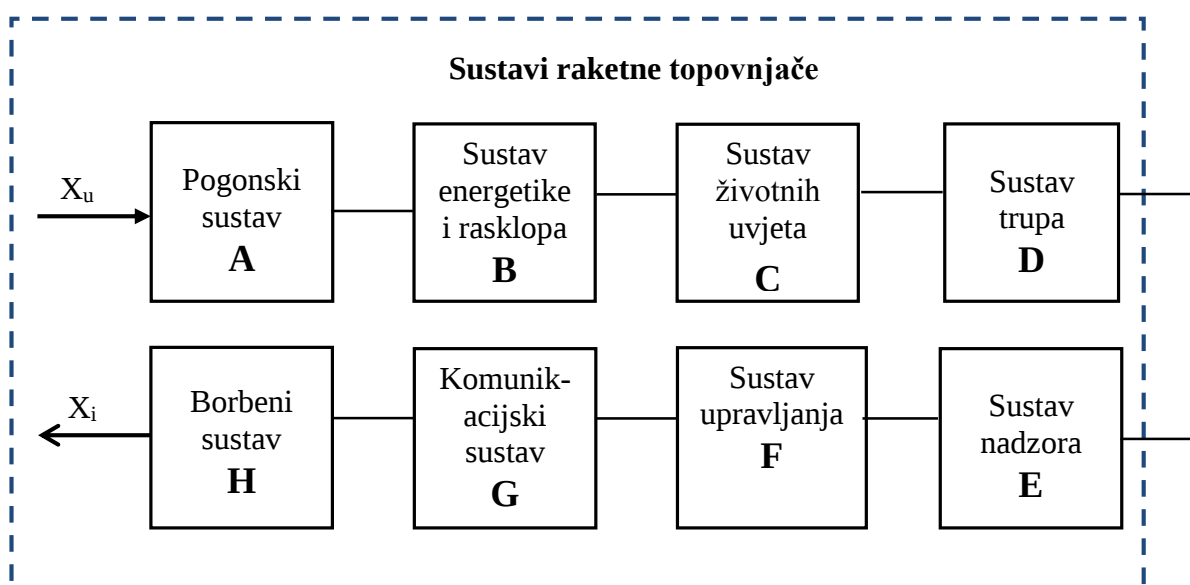
1. Brzookretni radijalni motori M 504 B2, ugrađeni na RTOP-11 i RTOP-12, u periodu od 500 radnih sati najviše su korišteni u osnovnom režimu rada (prazni hod, manevar i režim od  $750 \text{ min}^{-1}$ ), a to je, prema napatku proizvođača motora [54], izrazito nepovoljno za pogonski motor, jer su u osnovnom režimu radili cca 45 % od ukupnog vremena, dok su na režimima  $1500 \text{ min}^{-1}$  i više radili svega 15 % na RTOP-11 i 24 % na RTOP-12.
2. Ovakav neprikladan način korištenja motora suprotan je preporukama proizvođača [50] za njihovu uporabu, a također može uzrokovati pojavljivanje kvarova i eksploatacijsku nepouzdanost motora.
3. Budući da se radi o pojavi koja nije u skladu s preporukama proizvođača, a operativni uvjeti uporabe i mogućnosti HRM-a zahtijevali su upravo takvo korištenje motora u realnim uvjetima, ovakvu je pojavu bilo potrebno istražiti i u takvim operativnim uvjetima odrediti eksploatacijsku pouzdanost i pogodnost održavanja brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora M 504 B2.

U sljedećem će poglavlju pozornost biti usmjerena na istraživanje i analizu modela pouzdanosti raketne topovnjače i brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2.



#### 4 MODEL POUZDANOSTI RAKETNE TOPOVNJAČE

Općenito je poznato, prema literaturi [3], [6], [25], [28], [30], [32], da je prilikom analize eksploatacijske pouzdanosti nekog složenog tehničkog sustava kao što je ratni brod, nužno takav sustav razložiti na pojedine funkcionalne cjeline i izraditi blok- dijagram pouzdanosti (Reliability Block Diagram). Funkcija pouzdanosti svakog tehničkog sustava ovisna je o ispravnom radu svakog podsustava, a blok-dijagram pouzdanosti pokazuje kako su međusobno povezani podsustavi i kakav je njihov utjecaj na pouzdanost ukupnog sustava. Postoje sljedeći modeli povezivanja elemenata u blok-dijagram pouzdanosti: serijski model, paralelni model, paralelno-serijski model i serijsko-paralelni model pouzdanosti. U modeliranju blok-dijagrama pouzdanosti raketne topovnjače bilo je potrebno utvrditi razinu složenosti dijelova sustava koji se prikazuju kao posebni blokovi. Nakon provedenog istraživanja i analize u prethodnom poglavlju ove disertacije utvrđeno je da se raketna topovnjača kao složeni tehnički sustav može podijeliti na osam podsustava, kako je prikazano na blok-dijagramu pouzdanosti raketne topovnjače (slika 4.1).



Slika 4.1 Blok-dijagram pouzdanosti RTOP-a

Nedvojbeno je, što je vidljivo iz blok-dijagrama pouzdanosti raketne topovnjače na slici 4.1, da su svi podsustavi u serijskoj vezi. Serijska veza ukazuje na činjenicu da sustav uspješno izvršava zadaću samo ako i svi podsustavi uspješno ostvaruju svoju zadaću. Pouzdanost sustava uvjetovana je pouzdanošću svih podsustava, a kvar jednog podsustava uvjetuje da sustav u cjelini ne ostvaruje svoju namjenu, odnosno takav sustav je nepouzdan.

Matematički izraz pouzdanosti sustava u serijskoj vezi određen je sljedećim izrazom:

$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (4.1)$$

gdje je :

$R_S$  – funkcija pouzdanosti sustava,

$R_i$  – funkcija pouzdanosti  $i$ -tog podsustava.

Ako je pouzdanost  $i$ -tog podsustava konstantna i jednaka, tj.  $R_i = R$ , tada je pouzdanost sustava jednaka  $R_S = R^n$ . Očito je da će pouzdanost sustava biti uvijek manja od najmanje pouzdanosti pojedinog elementa u sustavu, tj.  $R_S < R_i$ .

Analogno izrazu (4.1), pouzdanost sustava s paralelnom vezom podsustava određena je sljedećim izrazom:

$$R_S = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (4.2)$$

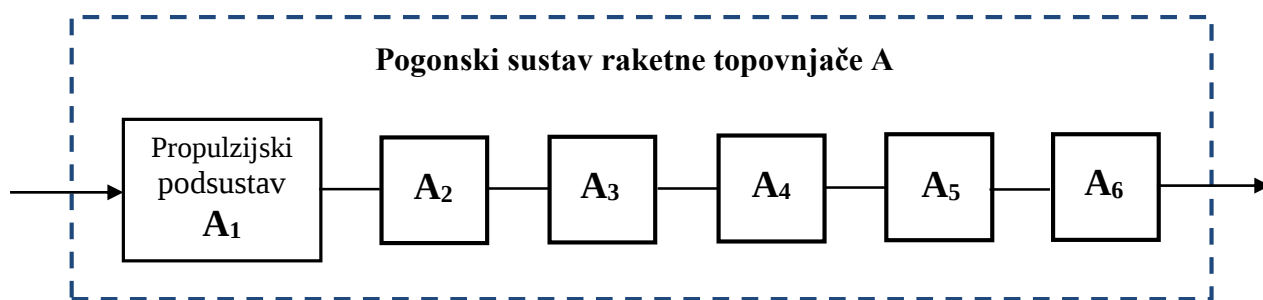
Ako je pouzdanost  $i$ -tog podsustava konstantna i jednaka, tj.  $R_i = R$ , tada je pouzdanost sustava  $R_S$  određena izrazom:

$$R_S = 1 - (1 - R)^n \quad (4.3)$$

Budući da je u fokusu istraživanja ove doktorske disertacije pogonski sustav raketne topovnjače, u nastavku će se pobliže analizirati njegovi podsustavi.

#### 4.1 Pouzdanost pogonskog sustava raketne topovnjače

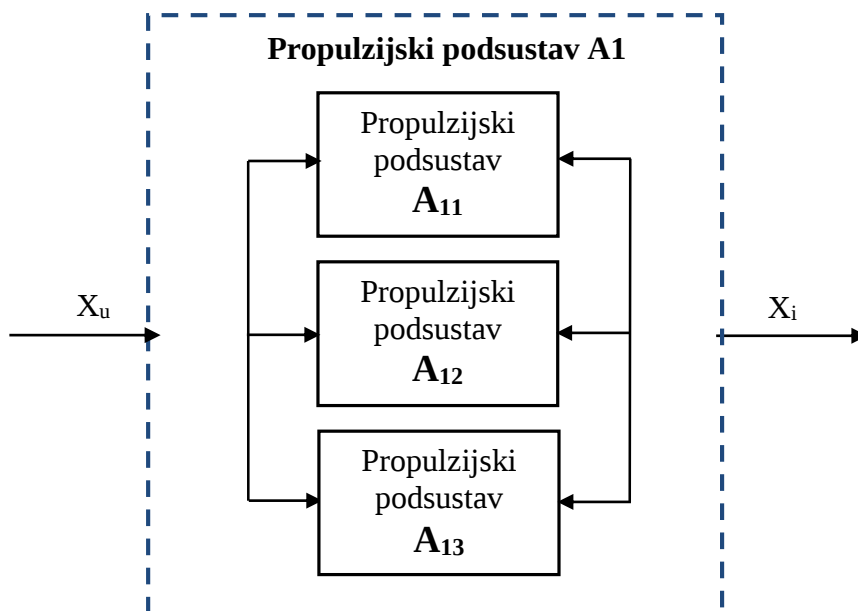
U svrhu modeliranja blok-dijagrama pouzdanosti, pogonski sustav podijeljen je na sljedeće podsustave: propulzijski podsustav  $A_1$ , podsustav maziva  $A_2$ , podsustav nadzora i upravljanja  $A_3$ , podsustav hlađenja  $A_4$ , podsustav visokotlačnog zraka  $A_5$ , podsustav goriva  $A_6$ . Na slici 4.2 prikazan je blok-dijagram pouzdanosti pogonskog sustava.



Slika 4.2 Blok-dijagram pouzdanosti pogonskog sustava

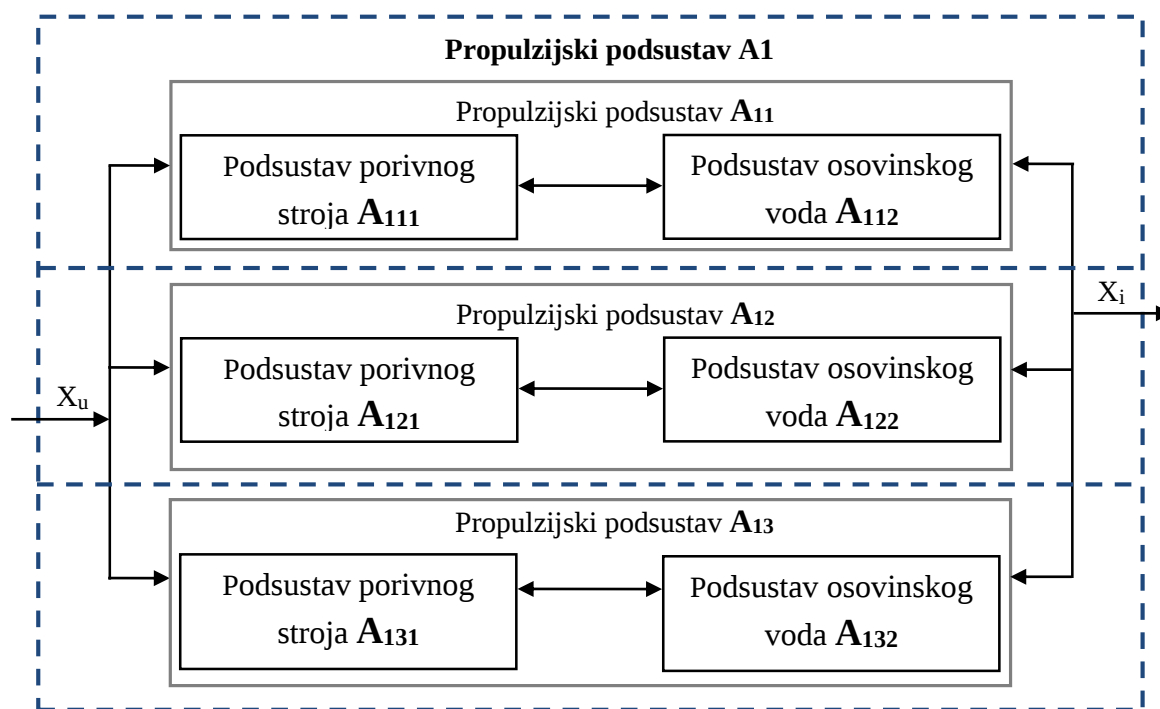
Prvi element pogonskog podsustava je propulzijski podsustav  $A_1$ . Redundantnost propulzijskog podsustava na raketnoj topovnjači, a kako je to prethodno opisano u točki 2.2.2, osigurana je ugradnjom tri zasebna podsustava propulzije.

Ugrađeni sustavi propulzije mogu raditi nezavisno jedan o drugom ili spregnuti, u kombinaciji bilo koja dva ili sva tri zajedno. Zato se propulzijski sustav na raketnoj topovnjači opisuje paralelnim modelom pouzdanosti, a na slici 4.3 prikazan je blok-dijagram paralelnog modela pouzdanosti propulzijskog podsustava raketne topovnjače.



Slika 4.3 Blok-dijagram pouzdanosti propulzijskog podsustava

U skladu sa slikom 2.7, i prethodno definiranim, propulzijski podsustav raketne topovnjače sastoji se od osovinskog voda i porivnog stroja, a na slici 4.4 prikazan je prošireni blok-dijagram propulzijskog podsustava.



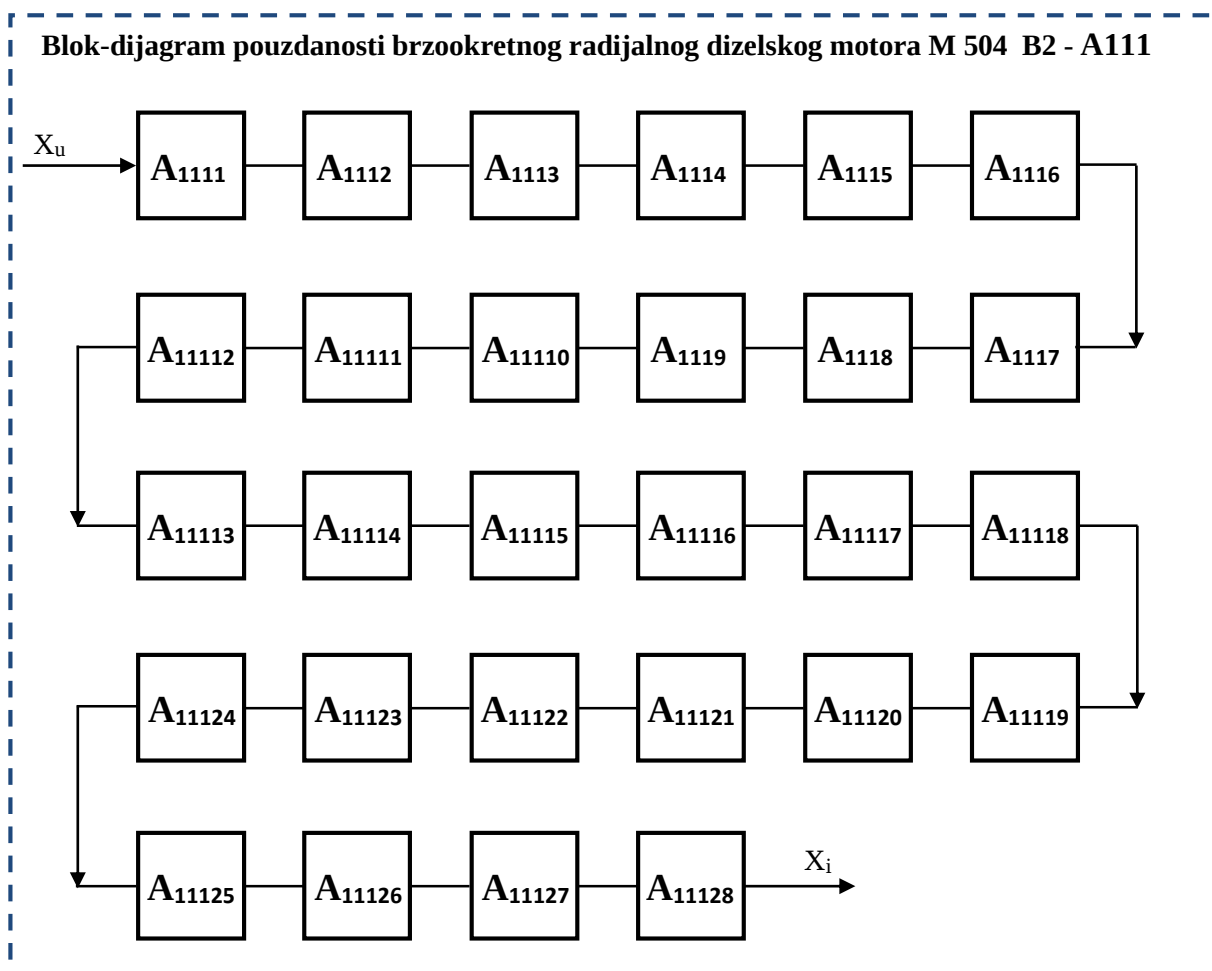
Slika 4.4 Prošireni blok-dijagram pouzdanosti propulzijskog podsustava

Polazeći od dosad navedenog, brzookretni radijalni brodski dizelski motor M 504 B2 promatrat će se u okviru prije spomenutog blok-dijagrama pouzdanosti propulzijskog podsustava.

#### 4.2. Pouzdanost brodskog dizelskog motora M 504 B2

U ovom potpoglavlju napravljen je grafički model pouzdanosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2, a model je univerzalno primjenljiv na bilo koji brzookretni brodski dizelski motor s manjim preinakama ovisno o tipu i njegovim podsustavima.

Blok-dijagram pouzdanosti dizelskog motora M 504 B2 izrađen je temeljem tehničke dokumentacije proizvođača motora [54] i prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5 Prošireni blok-dijagram pouzdanosti dizelskog motora M 504 B2

Sustav brzookretnog radijalnog motora M 504 B2 sačinjava (prema proizvođaču) dvadeset i osam serijski ovisnih podsustava od kojih je svaki sastavljen od sklopova, podsklupova i elemenata.

Pouzdanost brzookretnog dizelskog motora M 504 B2 jednaka je umnošku pouzdanosti svih podsustava od kojih se sastoji, a to je opisano sljedećim izrazom:

$$R_{M504B2}(t) = P(A_{1111}) \cdot P(A_{1112}) \cdot P(A_{1113}) \cdot P(A_{1114}) \cdot \dots \cdot P(A_{11127}) \cdot P(A_{11128}) \quad (4.4)$$

Pouzdanost motora M 504 B2 kao sustava u serijskoj vezi određena je izrazom:

$$R_{M504B2} = R_{1111} \cdot R_{1112} \cdot R_{1113} \cdot \dots \cdot R_{11128} = \prod_{n=1}^{n=28} R_n \quad (4.5)$$

Prema tehničkom opisu proizvođača dizelskog motora M 504 B2 (A111) radi se o sljedećim podsustavima [54]:

- dobavne pumpe ulja (A1111),
- reduktora (A1112),
- prekretna spojke (A1113),
- cjevovoda goriva (A1114),
- cilindarskih blokova (A1115),
- klipne grupe (A1116),
- sklopa klipnjača (A1117),
- koljenaste osovine (A1118),
- blok-pumpe goriva (A1119),
- razvodnog mehanizma (A11110),
- sustava za upravljanje blok-pumpama goriva (A11111),
- odušnih cijevi (A11112),
- regulatora brzine vrtnje s pogonom (A11113),
- ispušnog voda (A11114),
- prigušivača buke (A11115),
- turbopuhala (A11116),
- sprovednika zraka (A11117),
- agregatnog sklopa (A11118),
- prijenosnika (A11119),
- pumpe za izbacivanje ulja iz blokova (A11120),
- kućišta (A11121),
- pogona agregata (A11122),
- pumpe za izbacivanje ulja iz motora (A11123),
- ubrizgača goriva (A11124),
- pumpe visokog tlaka goriva (A11125),
- pumpe slatke vode (A11126),
- sklopova sustava za upućivanje motora (A11127),
- pričvršćenja motora i pumpe morske vode (A11128).

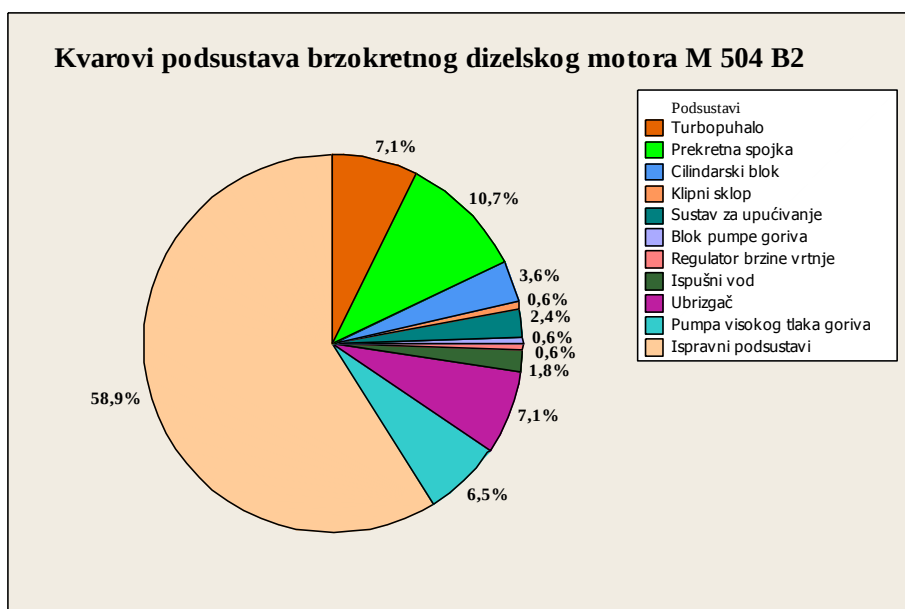
Postoji razlika u definiciji brodskih podsustava u sklopu ovog istraživanja u odnosu na čestu podjelu brodskih podsustava u svrhu analize pouzdanosti prema [11], no zbog vjerodostojnosti istraživanja zadržana je podjela brzookretnog radijalnog dizelskog motora na podsustave prema literaturi proizvođača motora M 504 B2.

Tijekom istraživanja pouzdanosti brzookretnog dizelskog motora M 504 B2 analizirano je ukupno šest motora s ukupno 168 podsustava čiji kvar uzrokuje prestanak rada sustava kao cjeline. Evidentirano je 69 kvarova na deset različitih podsustava, a podsustavi dizelskog motora M 504 B2 na kojima su evidentirani kvarovi bili su sljedeći: turbopuhalo (A11116), prekretna spojka (A1113), cilindarski blok (A1115), klipne grupe (A1116), blok-pumpa goriva

(A1119), regulator brzine vrtnje s pogonom (A11113), ispušni vod (A11114), ubrizgač goriva (A11124), pumpa visokog tlaka goriva (A11125) i sklopova sustava za upućivanje (A11127). Vremena pojave kvarova prikazana su u tablici 4.1 u odnosu na svaki pojedini sustav i mjesto pojave kvara. Vremensko razdoblje u kojem se promatra nastanak kvara iznosi 2000 radnih sati, a to je vrijeme rada motora do glavne revizije.

Tablica 4.1 je podijeljena na dva dijela: u prvom dijelu predstavljaju se rezultati do 1000 sati, a u drugom dijelu od 1000 do 2000 radnih sati motora.

Slijedom rezultata istraživanja prikazanih u tablici 4.1 izrađen je dijagram dat na slici 4.6 iz kojeg se uočava da je ispravnih podsustava bilo cca 59 %, dok se najveći broj kvarova pojavio na prekretnoj spojci (10,7 %), turbopuhalu i ubrizgaču goriva (po 7,1 %) te pumpi visokog tlaka goriva (6,5 %), a to kumulativno iznosi 30,7 %.



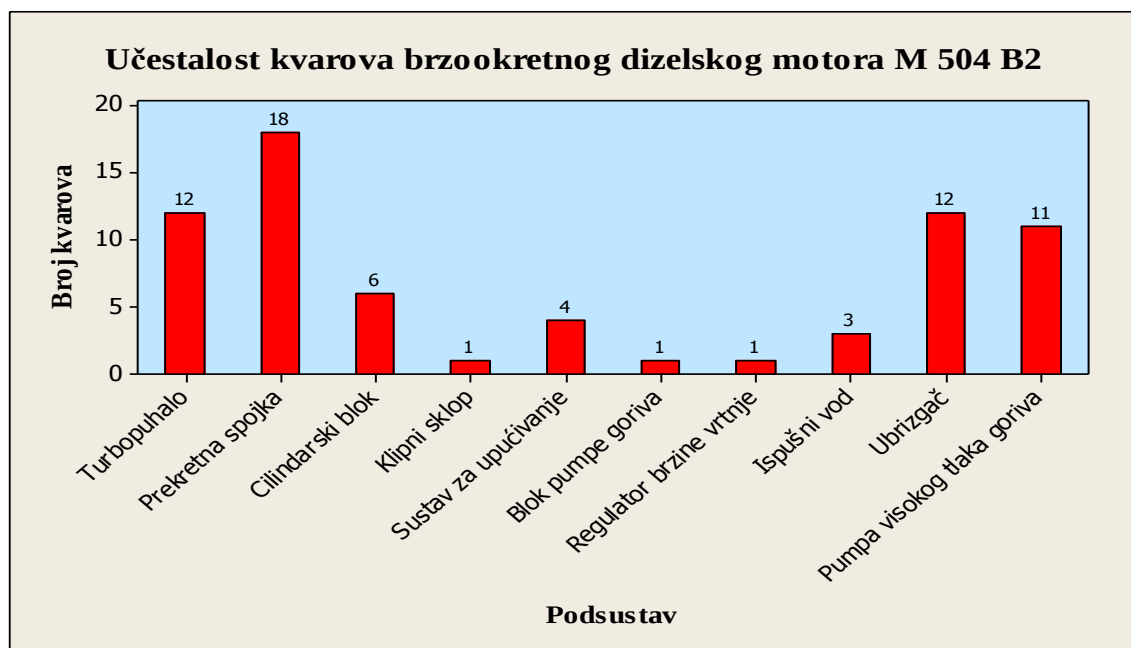
Slika.4.6 Kvarovi podsustava brzookretnog dizelskog motora M 504 B2

Tablica 4.1 Vremena pojave kvara na podsustavima dizelskog motora M 504 B2

| Podsustav                  | Mjesto kvara                      | <100   | <200  | < 300  | < 400            | < 500  | < 600                 | < 700         | < 800 | < 900  | < 1000         |
|----------------------------|-----------------------------------|--------|-------|--------|------------------|--------|-----------------------|---------------|-------|--------|----------------|
| Turbopuhalo                | Rotor                             |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Regulacijski ventil               |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Labirint                          |        |       |        |                  |        |                       | 643           |       |        |                |
|                            | Usmjerivači plinova               |        |       |        | 318,40           |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Brтва                             |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Vijak za regulaciju               |        |       |        | 338,40<br>380,55 |        |                       |               | 725   |        |                |
|                            | Kučiste                           |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
| Prekretna spojka           | Suport spojke                     |        |       | 291,40 |                  | 491,50 | 520 525<br>540<br>558 | 603,50<br>628 |       |        | 970 976        |
|                            | Kučiste spojke                    |        | 153   |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
| Cilindarski blok           | Curenje goriva                    |        |       |        |                  |        | 585                   |               |       |        |                |
|                            | Propuštanje kompresije            |        | 149   |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Emulzija u cilindru               |        |       |        |                  |        |                       |               | 730   |        |                |
|                            | Propuštanje goriva bloka cilindra |        |       | 266,30 |                  |        |                       | 638,40        |       |        |                |
| Klipni sklop               | Oštećenje klipa                   |        |       |        |                  | 450    |                       |               |       |        |                |
| Sustav za upućivanje       | Lom uputnog ventila               |        |       |        |                  | 439,30 |                       |               |       |        |                |
|                            | Blokiran uputni ventil            |        |       |        |                  |        | 504,35<br>534         |               |       |        |                |
| Blok-pumpa goriva          | Letva goriva                      |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
| Regulator brzine vrtnje    | Lom opruge regulatora             |        |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
| Ispušni vod                | Propuštanje emulzije              |        |       |        |                  |        |                       | 613           |       |        |                |
|                            | Puknuće vijka                     | 31,15  |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
| Ubrizgač                   | Izgorio rasprskič                 | 76     |       |        |                  |        |                       |               |       |        |                |
|                            | Procurio rasprskič                | 95     | 107,5 |        |                  |        | 536,20                | 613           |       | 850,35 | 925 930<br>960 |
| Pumpa visokog tlaka goriva | Propuštanje goriva                | 57, 55 |       |        | 370              |        |                       |               | 780   |        |                |
|                            | Blokiran mehanizam upravljanja    |        |       |        | 337,35           |        |                       |               |       |        |                |
| Ukupan broj kvarova        |                                   | 5      | 3     | 2      | 5                | 3      | 8                     | 6             | 3     | 1      | 5              |

| Podsustav                  | Mjesto kvara                      | < 1100       | < 1200       | < 1300 | < 1400 | < 1500 | < 1600 | < 1700 | < 1800 | < 1900 | < 2000 | Ukupno |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Turbopuhalo                | Rotor                             |              | 1200         |        |        |        |        |        |        | 1870   |        | 12     |
|                            | Regulacijski ventil               | 1041         |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                            | Labirint                          |              |              |        |        |        |        |        | 1725   |        |        |        |
|                            | Usmjerivači plinova               |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                            | Brtva                             |              |              |        |        |        |        | 1698   |        |        |        |        |
|                            | Vijak za regulaciju               |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                            | Kučiste                           |              |              |        |        |        | 1535   |        |        |        | 1900   |        |
| Prekretna spojka           | Suport spojke                     | 1040<br>1090 | 1120<br>1135 |        |        | 1490   | 1590   | 1698   |        |        |        | 18     |
|                            | Kučiste spojke                    |              |              |        |        | 1470   |        |        |        |        |        |        |
| Cilindarski blok           | Curenje goriva                    |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        | 6      |
|                            | Propuštanje kompresije            |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                            | Emulzija u cilindru               |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                            | Propuštanje goriva bloka cilindra |              |              |        |        |        |        |        | 1724   |        |        |        |
| Klipni sklop               | Oštećenje klipa                   |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        | 1      |
| Sustav za upućivanje       | Lom uputnog ventila               |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        | 4      |
|                            | Blokiran uputni ventil            |              |              | 1235   |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Blok-pumpa goriva          | Letva goriva                      |              |              |        |        |        |        | 1620   |        |        |        | 1      |
| Regulator brzine vrtnje    | Lom opruge regulatora             |              |              | 1243   |        |        |        |        |        |        |        | 1      |
| Ispušni vod                | Propuštanje emulzije              |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        | 3      |
|                            | Puknuće vijka                     |              |              |        |        |        |        |        |        | 1880   |        |        |
| Ubrizgač                   | Izgorio rasprskič                 |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        | 12     |
|                            | Procurio rasprskič                |              |              |        | 1370   |        | 1568   |        |        |        |        |        |
| Pumpa visokog tlaka goriva | Propuštanje goriva                | 1080         |              |        | 1300   | 1450   | 1520   | 1670   | 1780   |        |        | 11     |
|                            | Blokiran mehanizam upravljanja    |              |              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Ukupan broj kvarova        |                                   | 4            | 3            | 2      | 2      | 3      | 4      | 4      | 3      | 2      | 1      | 69     |

Na slici 4.7 prikazana je učestalost pojavljivanja kvarova na podsustavima brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2.



Slika 4.7 Učestalost kvarova na brzookretnom dizelskom motoru M 504 B2

U svrhu izrade tablice 4.1 i dijagrama na slikama 4.6 i 4.7 korišteni su empirijski podaci izuzeti iz brodske dokumentacije [51], [52], [55], [61], o kojoj je više riječi bilo u poglavlju 3.

Važno je naglasiti kako su tijekom istraživanja pouzdanosti brzookretnog dizelskog motora M 504 B2 razmatrani samo oni kvarovi koji su uzrokovali nemogućnost uporabe pogonskog podsustava na propisan način.

Najbolji način analiziranja prije prikupljenih i predstavljenih empirijskih podataka je da se na temelju njih odrede funkcija gustoća kvara, funkcija intenziteta kvara i funkcija pouzdanosti brzookretnog dizelskog motora M 504 B2.

### 4.3 Analiza pouzdanosti brodskog dizelskog motora

Općenito se pouzdanost nekog tehničkog sustava opisuje funkcijom pouzdanosti  $R(t)$  prema [3], [6], [11]:

$$R(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} \quad (4.6)$$

gdje je:

$f(t)$  – funkcija gustoće kvara,

$\lambda(t)$  – funkcija intenziteta kvara.

Prema relaciji (4.6) može se ustvrditi da primjerice dva različita tehnička sustava mogu imati istu pouzdanost  $R_1(t)=R_2(t)$  u određenom trenutku  $t$ , ali im se intenzitet kvara  $\lambda_1(t)$  i  $\lambda_2(t)$  do tog vremena  $t$  mogu razlikovati, jer vrijedi odnos [3], [6]:

$$R(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = \frac{f_1(t)}{\lambda_1(t)} = \frac{f_2(t)}{\lambda_2(t)} \quad (4.7)$$

Stoga je pouzdanost nekog tehničkog sustava određena ako su poznate dvije funkcije: funkcija pouzdanosti  $R(t)$  i funkcija intenziteta kvara  $\lambda(t)$ . Za određeni tehnički sustav funkcija pouzdanosti i funkcija intenziteta kvara su jedinstvene, odnosno određenoj funkciji pouzdanosti odgovara određena funkcija intenziteta kvara. Matematički se u najopćenitijem obliku funkcija pouzdanosti  $R(t)$  može opisati relacijom (4.8) prema [3], [6] i može se primijeniti za bilo koju funkciju gustoće kvara  $f(t)$ .

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (4.8)$$

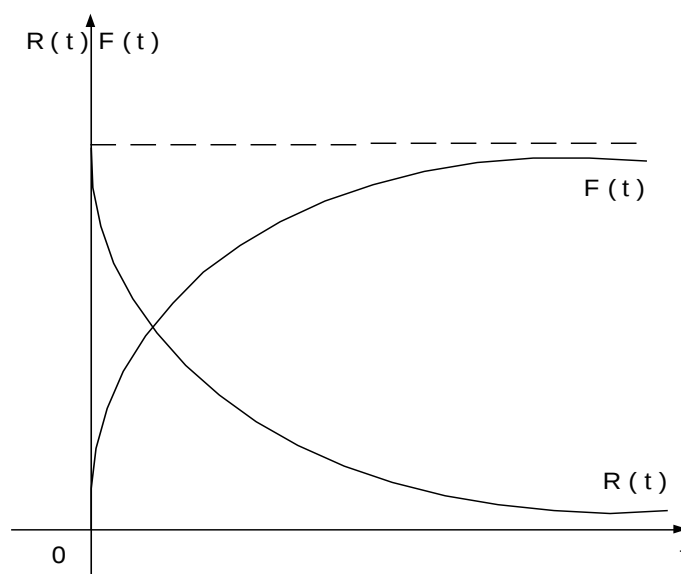
U tom slučaju očekivano vrijeme rada bez kvara određeno je izrazom:

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4.9)$$

gdje je:

$T$  – slučajno promjenljiva varijabla.

Približan oblik funkcije pouzdanosti  $R(t)$  prikazan je na slici 4.8. Funkcija pouzdanosti monotono pada, tj.  $R(0)=1$  i  $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t)=0$ .



Slika 4.8 Grafička interpretacija funkcija  $R(t)$  i  $F(t)$  [6]

Vjerojatnost kvara  $P(T \leq t)$  u funkciji tog vremena određena je sljedećom relacijom:

$$P(T \leq t) = F(t) = 1 - R(t) \quad (4.10)$$

gdje je:

$F(t)$  – funkcija distribucije kvara sustava.

Tada vrijedi da je funkcija gustoće kvara  $f(t)$  jednaka prvoj derivaciji funkcije distribucije kvara  $F(t)$ , kako je opisano relacijom (3.11):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.11)$$

U teoriji vjerojatnosti funkcija  $f(t)$  naziva se i *funkcija distribucije gustoće kvara*, te se u teoriji pouzdanosti za kontinuirane procese najčešće primjenjuju funkcije gustoće kvara navedene u tablici 4.2 [33].

Tablica 4.2 Funkcije distribucije gustoće kvara i očekivano vrijeme rada bez kvara.

| Vrsta distribucije kvara | $f(t)$                                                                                                                 | $E(T)$                                                       |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Eksponecijalna           | $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$                                                                            | $E(T) = \frac{1}{\lambda}$                                   |
| Normalna (Gauss)         | $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$                         | $E(T) = \mu$                                                 |
| Logonormalna             | $f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$           | $E(T) = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}$                       |
| Weibullova               | $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ | $E(T) = \gamma + \eta\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ |
| Gama                     | $f(t) = \frac{1}{\eta\Gamma(\beta)} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{t-\gamma}{\eta}}$           | $E(T) = \gamma + \eta\beta$                                  |

Najbolja ili „najpogodnija“ funkcija gustoće kvara  $f(t)$ , a samim time i funkcija intenziteta kvara  $\lambda(t)$  te funkcija pouzdanosti  $R(t)$  određuju se na temelju dobivenih podataka iz eksploatacije sustava. Temeljem podataka empirijska funkcija gustoće kvara  $f_e(t)$  definira se relacijom (4.12) prema [6]:

$$f_e(t) = \lambda_e(t) \cdot R_e(t) \quad (4.12)$$

gdje je:

$\lambda_e(t)$  – empirijska funkcija intenziteta kvara,

$R_e(t)$  – empirijska funkcija pouzdanosti.

Ako se tehnički sustav (u ovom slučaju brodski dizelski motor) obnavlja održavanjem ili popravkom, tj. u slučaju tzv. popravljivih sustava, očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  poznato je pod nazivom srednje vrijeme između kvara (Mean Time Between Failures, MTBF) i izračunava se prema relaciji (4.13), prema [6], [30]:

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.13)$$

gdje je:

$n$  – broj kvarova tehničkih sustava,

$t_i$  –  $i$ -to vrijeme kvara tehničkog sustava.

Na temelju prikupljenih empirijskih podataka odredit će se empirijska funkcija gustoće kvara  $f_e(t)$ , empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i empirijska funkcija pouzdanosti  $R_e(t)$ .

#### 4.3.1 Određivanje empirijskih funkcija gustoće kvara dizelskog motora

Empirijska funkcija gustoće kvara određuje se razmatrajući  $n$  sustava i mjerenja, u vremenskim intervalima dužine  $\Delta t_j$ , imajući na umu da polazeći od  $t = 0$  u bilo kom trenutku vremena  $t$  ima  $n_1(t)$  ispravnih sustava (sustava koji nisu imali kvar). U tom će slučaju empirijska funkcija gustoće kvarova  $f_e(t)$  biti određena sljedećim izrazom [6], [33]:

$$f_e(t) = \frac{n_1(t_j) - n_1(t_j + \Delta t_j)}{n \Delta t_j} \quad (4.14)$$

gdje je:  $t_j \leq t \leq t_j + \Delta t_j$ .

Empirijska funkcija gustoće kvara  $f_e(t)$  jednaka je odnosu između broja kvarova u vremenskom intervalu  $\Delta t_j$  i ukupnog broja sustava  $n$  prethodno pomnoženog s vremenskim intervalom  $\Delta t_j$ .

Empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  određena je sljedećim izrazom [6], [33]:

$$\lambda_e(t) = \frac{n_1(t_j) - n_1(t_j + \Delta t_j)}{n_1(t_j) \Delta t_j} \quad (4.15)$$

gdje je:  $t_j \leq t \leq t_j + \Delta t_j$ .

Empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  jednaka je dakle odnosu između broja kvarova u intervalu vremena  $\Delta t_j$  i broja sustava koji se nisu kvarili na kraju vremenskog intervala  $n_1(t_j + \Delta t_j)$  prethodno pomnoženog s vremenskim intervalom  $\Delta t_j$ .

Empirijska funkcija pouzdanosti  $R_e(t_j)$  određena je sljedećim izrazom [6], [33]:

$$R_e(t) = \frac{n_1(t_j + \Delta t_j)}{n} \quad (4.16)$$

gdje je:  $t_j \leq t \leq t_j + \Delta t_j$ .

Empirijska funkcija pouzdanosti  $R_e(t_j)$  jednaka je dakle odnosu između broja sustava koji nisu imali kvar na kraju vremenskog intervala  $n_1(t_j + \Delta t_j)$  i ukupnog broja kvarova sustava  $n$ .

Slijedom relacija 4.14, 4.15 i 4.16 dobiva se sljedeća jednadžba:

$$\left( \frac{n_1(t_j) - n_1(t_j + \Delta t_j)}{n \Delta t_j} \right) = \left( \frac{n_1(t_j) - n_1(t_j + \Delta t_j)}{n_1(t_j) \Delta t_j} \right) \cdot \left( \frac{n_1(t_j + \Delta t_j)}{n} \right) \quad (4.17)$$

$$f_e(t) = \lambda_e(t) \cdot R_e(t)$$

Empirijska funkcija gustoće kvara  $f_e(t)$  predstavlja zapravo mjeru sveukupne „brzine“ pojavljivanja kvara, dok je empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  mjera trenutne „brzine“ pojavljivanja kvara.

U općem slučaju vremenski intervali  $\Delta t_j$  mogu biti nejednakog trajanja, no kada je prisutan veći broj kvarova (kao što je u promatranom slučaju) tada su vremenski intervali konstantni, a njihov broj određuje se na temelju sljedećeg izraza [6], [33]:

$$k = 1 + 3,3 \cdot \log n_2 \quad (4.18)$$

gdje je:

$k$  – optimalan broj vremenskih intervala,

$n_2$  – ukupni broj kvarova.

U praktičnoj primjeni optimalan broj vremenskih intervala  $k$  izračunava se kao decimalni broj i zaokružuje se na niži cijeli broj.

U konkretno analiziranom slučaju pouzdanosti dizelskog motora M 504 B2, prema tablici 3.1, ukupan broj kvarova iznosi  $n_2=69$ , a vrijeme u kojem se promatra nastanak kvara iznosi  $t_p=2000$  radnih sati, što predstavlja period rada motora do glavne revizije.

Slijedom navedenog vrijedi da je  $k = 1 + 3,3 \cdot \log 69 = 7,068$  (zaokružuje se na prvi niži cijeli broj 7), a vremenski interval  $\Delta t_j$  iznosi:

$$\Delta t_j = t_p / 7 = 2000 / 7 = 285,7 \text{ h; (zaokružuje se na } \Delta t_j = 285 \text{ h)} \quad (4.19)$$

Na temelju tablice 3.1, a u svrhu određivanja empirijske funkcije gustoće kvara  $f_e(t)$ , empirijske funkcije intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i empirijske funkcije pouzdanosti  $R_e(t)$  te srednjeg vremena između kvara (MTBF), izrađena je kumulativna tablica kvarova (tablica 4.3).

Tablica 4.3 Kumulativna tablica kvarova broskog dizelskog motora M 504 B2

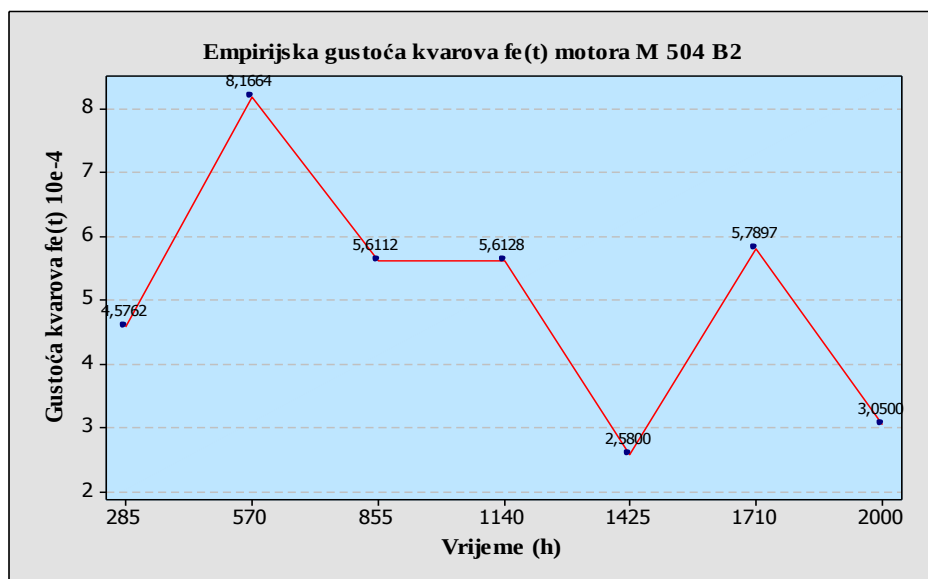
| Redni broj<br>podsustava<br>(n) | Vrijeme kvara<br>(t <sub>i</sub> ) | Redni broj<br>podsustava<br>(n) | Vrijeme kvara<br>(t <sub>i</sub> ) | Redni broj<br>podsustava<br>(n) | Vrijeme kvara<br>(t <sub>i</sub> ) |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                               | 31,15                              | 24                              | 540                                | 47                              | 1135                               |
| 2                               | 55                                 | 25                              | 558                                | 48                              | 1200                               |
| 3                               | 57                                 | 26                              | 585                                | 49                              | 1235                               |
| 4                               | 76                                 | 27                              | 603,5                              | 50                              | 1243                               |
| 5                               | 95                                 | 28                              | 613                                | 51                              | 1300                               |
| 6                               | 107,5                              | 29                              | 613                                | 52                              | 1370                               |
| 7                               | 149                                | 30                              | 628                                | 53                              | 1450                               |
| 8                               | 153                                | 31                              | 638,4                              | 54                              | 1470                               |
| 9                               | 291,4                              | 32                              | 643                                | 55                              | 1490                               |
| 10                              | 266,3                              | 33                              | 725                                | 56                              | 1520                               |
| 11                              | 318,4                              | 34                              | 730                                | 57                              | 1535                               |
| 12                              | 337,35                             | 35                              | 780                                | 58                              | 1568                               |
| 13                              | 338,4                              | 36                              | 850                                | 59                              | 1590                               |
| 14                              | 370,4                              | 37                              | 925                                | 60                              | 1620                               |
| 15                              | 380,55                             | 38                              | 930                                | 61                              | 1670                               |
| 16                              | 439,3                              | 39                              | 960                                | 62                              | 1698                               |
| 17                              | 450                                | 40                              | 970                                | 63                              | 1698                               |
| 18                              | 491,5                              | 41                              | 976                                | 64                              | 1724                               |
| 19                              | 504,35                             | 42                              | 1040                               | 65                              | 1725                               |
| 20                              | 520                                | 43                              | 1041                               | 66                              | 1780                               |
| 21                              | 525                                | 44                              | 1080                               | 67                              | 1870                               |
| 22                              | 534                                | 45                              | 1090                               | 68                              | 1880                               |
| 23                              | 536,2                              | 46                              | 1120                               | 69                              | 1900                               |
|                                 |                                    |                                 |                                    | Ukupno:                         | 61336,7                            |

Polazeći od tablice 4.3 i relacija od 4.14 do 4.19 u tablici 4.4 prikazani su izračunati podaci empirijske funkcije gustoće kvara  $f_e(t)$ , empirijske funkcije intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i empirijske funkcije pouzdanosti  $R_e(t)$ .

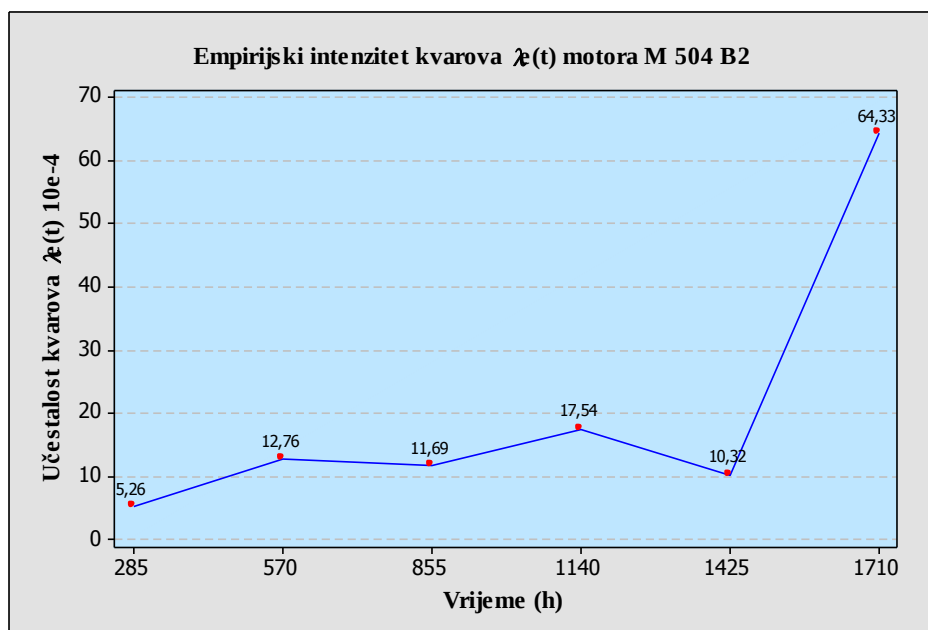
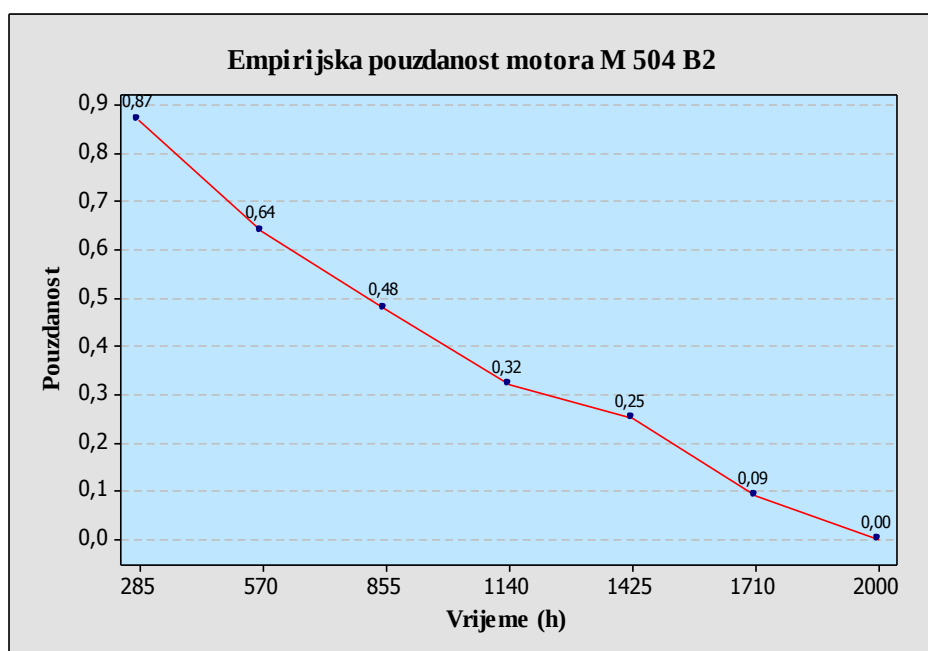
Tablica 4.4 Empirijske funkcije gustoće, intenziteta i pouzdanosti dizelskog motora M 504 B2

| EMPIRIJSKE FUNKCIJE                |                       |                                      |                                               |                     |                                      |                                               |                     |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Vrijeme Interval $\Delta(t)$ , (h) | Broj kvarova $n_i(t)$ | Gustoća kvara $f_e(t)$ [ $10^{-4}$ ] | Intenzitet kvara $\lambda_e(t)$ [ $10^{-4}$ ] | Pouzdanost $R_e(t)$ | Gustoća kvara $f_e(t)$ [ $10^{-4}$ ] | Intenzitet kvara $\lambda_e(t)$ [ $10^{-4}$ ] | Pouzdanost $R_e(t)$ |
| 0-285                              | 9                     | $9/(69 \cdot 285)$                   | $9/(60 \cdot 285)$                            | 60/69               | 4,5762                               | 5,26                                          | 0,87                |
| 285-570                            | 16                    | $16/(69 \cdot 285)$                  | $16/(44 \cdot 285)$                           | 44/69               | 8,1664                               | 12,76                                         | 0,64                |
| 570-855                            | 11                    | $11/(69 \cdot 285)$                  | $11/(33 \cdot 285)$                           | 33/69               | 5,6112                               | 11,69                                         | 0,48                |
| 855-1140                           | 11                    | $11/(69 \cdot 285)$                  | $11/(22 \cdot 285)$                           | 22/69               | 5,6128                               | 17,54                                         | 0,32                |
| 1140-1425                          | 5                     | $5/(69 \cdot 285)$                   | $5/(17 \cdot 285)$                            | 17/69               | 2,58                                 | 10,32                                         | 0,25                |
| 1425-1710                          | 11                    | $11/(69 \cdot 285)$                  | $11/(6 \cdot 285)$                            | 6/69                | 5,7897                               | 64,33                                         | 0,09                |
| 1710-2000                          | 6                     | $6/(69 \cdot 285)$                   | $6/(0 \cdot 285)$                             | 0                   | 3,05                                 | 0                                             | 0                   |
| $n = 69$                           |                       |                                      |                                               |                     |                                      |                                               |                     |

Na temelju podataka izračunatih u tablici 4.4 izrađeni su i prikazani na slikama 4.9, 4.10 i 4.11 dijagrami empirijske funkcije gustoće kvara  $f_e(t)$ , intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i pouzdanosti  $R_e(t)$  brzookretnog dizelskog motora M 504 B2.



Slika 4.9 Empirijska funkcija gustoće kvara dizelskog motora M 504 B2

Slika 4.10 Empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  dizelskog motora M 504 B2Slika 4.11 Empirijska funkcija pouzdanosti  $R_e(t)$  dizelskog motora M 504 B2

Polazeći od tablice 4.3, a na temelju relacije 4.13, srednje vrijeme između kvara motora M 504 B2 iznosi:

$$\text{MTBF} = 61336,7/69 = 888,94 \text{ h} \approx 890 \text{ h} \quad (4.19)$$

Operativna raspoloživost određuje se na temelju relacije 2.1, a u slučaju promatranog brodskog dizelskog motora M 504 B2 ona iznosi:

$$O_r = 61336,7/138000 = 0,44 = 44 \% \quad (4.20)$$

Isti će se rezultati za operativnu raspoloživost dobiti kada se srednje vrijeme između kvara (MTBF) podijeli s planiranim vremenom rada motora do glavne revizije, kako pokazuje relacija 4.21:

$$O_r = 888,94/2000 = 0,44 = 44 \% \quad (4.21)$$

Na temelju dobivenih rezultata istraživanja odnosno oblika empirijskih funkcija gustoće kvara  $f_e(t)$ , intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i pouzdanosti  $R_e(t)$  brzookretnog dizelskog motora M 504 B2, može se postaviti hipoteza:

- Weibullova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti motora brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora, odnosno
- očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora može se dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara (MTBF), tj. vrijedi da je  $E(T) = \text{MTBF}$ , ako se funkcija gustoće kvara ravna prema Weibullovoj distribuciji.

Stoga će se u nastavku provesti aproksimacija prije spomenutih empirijskih funkcija pomoću Weibullove distribucije i testiranje hipoteza.

#### 4.3.2 Aproksimacija Weibullovom distribucijom

Kada pojavljivanje kvarova nekog sustava pokazuje rastuću tendenciju u toku vremena, onda Weibullova distribucija omogućava analizu takvih pojava. Za razliku od eksponencijalne distribucije kod koje je intenzitet kvara konstantne vrijednosti, Weibullova distribucija uključuje padajuće, rastuće i konstantne vrijednosti funkcije intenziteta kvara. Funkcija gustoće kvara  $f(t)$  Weibullove distribucije, prema [3] i [6], definirana je sljedećim izrazom:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}, \quad t \geq \gamma, \quad \beta > 0, \quad \eta > 0 \quad (4.22)$$

gdje je:  $t$  vrijeme kvara sustava,  $\gamma$  parametar položaja,  $\beta$  parametar oblika, a  $\eta$  parametar razmjere. Parametar položaja  $\gamma$  može biti i negativan, a to znači da se sustav može pokvariti prije upotrebe (na skladištu). U trenutku puštanja sustava u rad parametar  $\gamma$  jednak je nuli, a vrijeme kvara sustava  $t$  je veće ili jednako  $\gamma$ .

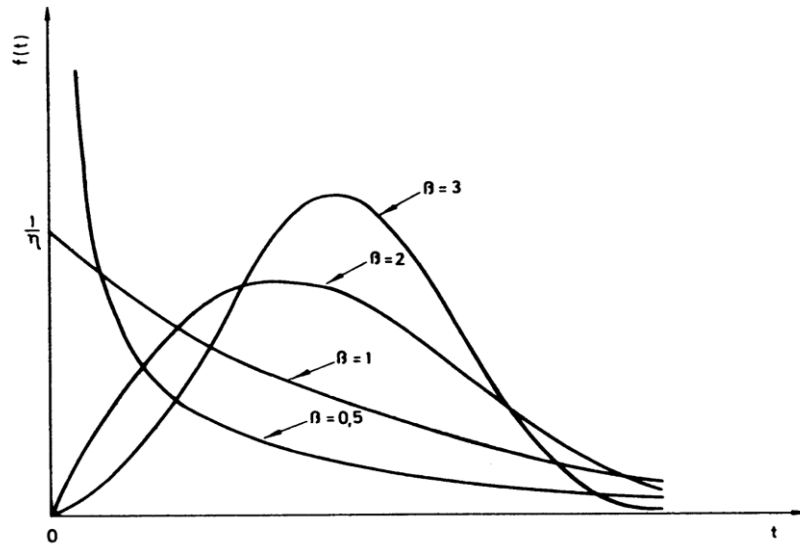
Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  određena je sljedećim izrazom:

$$R(t) = e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.23)$$

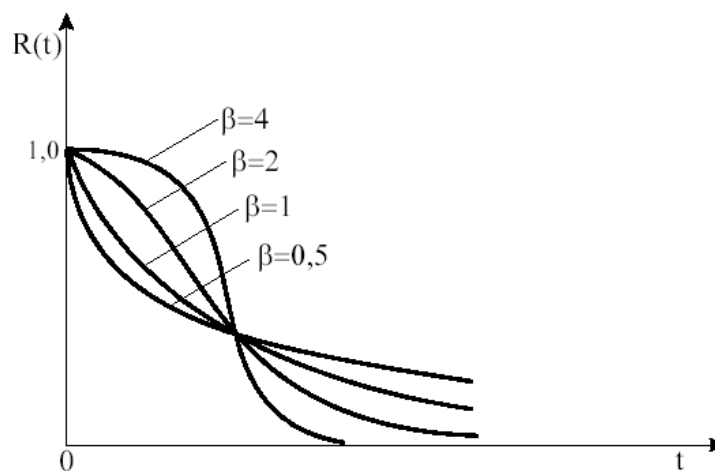
Funkcija intenziteta kvara  $\lambda(t)$  određena je sljedećim izrazom:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (4.24)$$

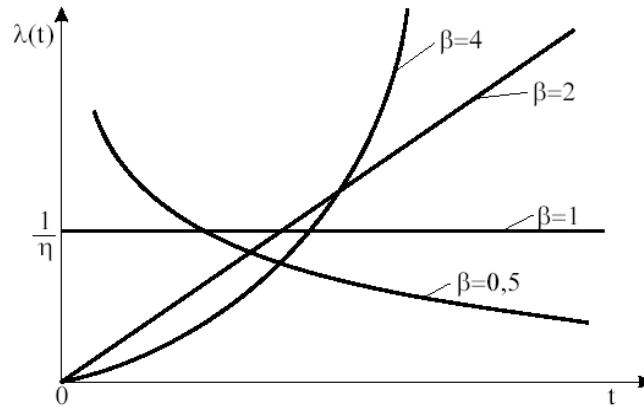
Oblici funkcija  $f(t)$ ,  $R(t)$ ,  $\lambda(t)$  ovisni su o vrijednosti parametara  $\gamma$ ,  $\beta$  i  $\eta$ . Na slikama 4.12, 4.13 i 4.14, prema [3] i [6], prikazani su razni oblici funkcije gustoće kvara ovisno o različitim vrijednostima parametra  $\beta$ , pri čemu je  $\gamma = 0$ , a  $\eta = \text{const.}$



Slika 4.12 Funkcija gustoće kvarova  $f(t)$  za  $\gamma = 0$ ,  $\eta = \text{const.}$  i razne vrijednosti parametra  $\beta$



Slika 4.13 Funkcija pouzdanosti  $R(t)$  za  $\gamma = 0$  i  $\eta = \text{const.}$  i razne vrijednosti parametra  $\beta$



Slika 4.14 Funkcija intenziteta kvara za  $\gamma = 0$  i  $\eta = \text{const.}$  i razne vrijednosti parametra  $\beta$

Očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  određeno je sljedećim izrazom [3], [6]:

$$E(T) = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (4.25)$$

gdje je:

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) - \text{gama funkcija od argumenta } \left(\frac{1}{\beta} + 1\right).$$

Polazeći od pretpostavke da Weibullova distribucija najbolje aproksimira empirijske funkcije, provest će se testiranje hipoteza uz pomoć programskog paketa Minitab 16 i Anderson-Darling (AD) testa.



## 5 TESTIRANJE HIPOTEZA

Polazeći od prije opisanog primjera, u ovoj će se točki testirati postavljena hipoteza da Weibullova distribucija najbolje aproksimira empirijske funkcije, a provest će se uz pomoć programskog paketa Minitab 16.

### 5.1 Programski paket Minitab 16

Posljednjih desetljeća istraživanje pouzdanosti složenih tehničkih sustava postaje sve pristupačnije i popularnije zahvaljujući razvoju informatičkih tehnologija koje omogućavaju jednostavnije prikupljanje, pohranu i obradu potrebnih podataka. U ovom doktorskom radu korišten je programski paket Minitab 16, [30], [62], [63], s ciljem identifikacije distribucije koja najbolje aproksimira empirijske funkcije gustoće kvara  $f_e(t)$ , intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$  i pouzdanosti  $R_e(t)$ . Polazna je hipoteza da je to Weibullova distribucija, a testiranje te pretpostavke (hipoteze) provest će se na temelju Anderson-Darling testa koji je sastavni dio programskog paketa Minitab 16. Računalni statistički program Minitab 16, danas u širokoj upotrebi u svrhu statističkih istraživanja i matematičkog modeliranja, omogućava nam različite statističke analize složenih prirodnih pojava, živih bića, složenih tehničkih sustava ili njihovih dijelova. Svrha upotrebe Minitab 16 programa u sklopu ove disertacije odabir je distribucije koju najbolje slijede empirijski podaci o kvarovima brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora te definiranje najpogodnije distribucije popravljivosti istraživnog tehničkog sustava.

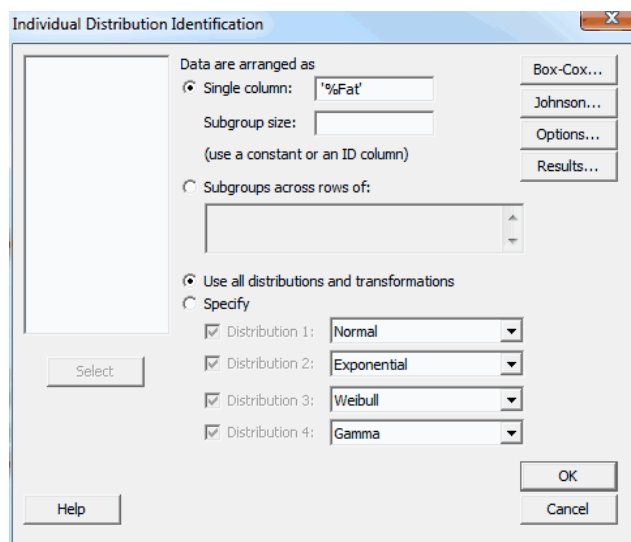
Minitab 16 osigurava dva testa ocjene prilagodbe (Goodness of fit test) empirijskih podataka, Anderson-Darling (AD) i Pearsonov koeficijent korelacije, u svrhu procjene koliko pojedina distribucija odgovara istraživanim empirijskim podacima. AD statistički test mjeri koliko precizno podaci prate pojedinu distribuciju za određeni skup podataka. Od brojnih kvantitativnih testova ocjene prilagodbe podataka (Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Shipiro-Wilk, von Mises), Anderson-Darling test najosjetljiviji je prema odstupanjima u repovima distribucije. AD test je neparametarski i primjenljiv je na bilo koju distribuciju: eksponencijalnu, normalnu, Weibullovu itd., ali pronalaženje kritičnih vrijednosti nije tako jednostavno. Kako bi se stručnjacima omogućila statistička analiza tijekom istraživanja različitih složenih pojava, AD test je, zbog praktičnih razloga, integriran u računalne statističke programe. Minitab 16 izračunava statistiku Anderson-Darling testa koristeći ili maksimalnu metodu procjene vjerojatnosti ili metodu procjene najmanjih kvadrata.

Prilikom provedbe istraživanja pokušaj utvrđivanja koju distribuciju prate podaci rezultira većim brojem Anderson-Darling statističkih podataka, ovisno o broju odabranih distribucija, pa je nužno provesti usporedbu dobivenih podataka u cilju prepoznavanja „najbolje distribucije“. Distribucija s najmanjim AD parametrom najbolje odgovara istraživanim podacima.

Anderson-Darling test tako predstavlja moćan statistički alat za usporedbu distribucija podataka koje istražujemo. AD test kao ocjena prilagodbe empirijski prikupljenih podataka uobičajeno se koristi u inženjerstvu i, što je posebno važno, osobito je koristan u slučaju kada istražujemo pojave s malim brojem uzoraka [17], [23], [63]. AD test se preporučuje u bilo kojem kontekstu eksperimentalnog istraživanja koje zahtijeva usporedbu uzoraka promjenljivih s vremenom.

Da bismo proveli testiranje, uzoraka mora biti minimalno tri i više uz činjenicu direktne povezanosti veličine uzorka sa snagom testa, što je određeno prirodom i svrhom istraživanja i testiranja podataka koje provodimo.

Iz teorije pouzdanosti [3], [6], [33] poznato je kako sve poznate distribucije nisu pogodne za analizu pouzdanosti složenih tehničkih sustava, posebno mehaničkih. Stoga u prvom koraku primjene programskog paketa Minitab 16 se odabire opcija „Stat > Quality Tools > Individual Distribution Identification“, kojom se odabiru potencijalne statističke distribucije (npr. normalna, eksponencijalna, Weibullova i gama-distribucija), prema slici 5.1.



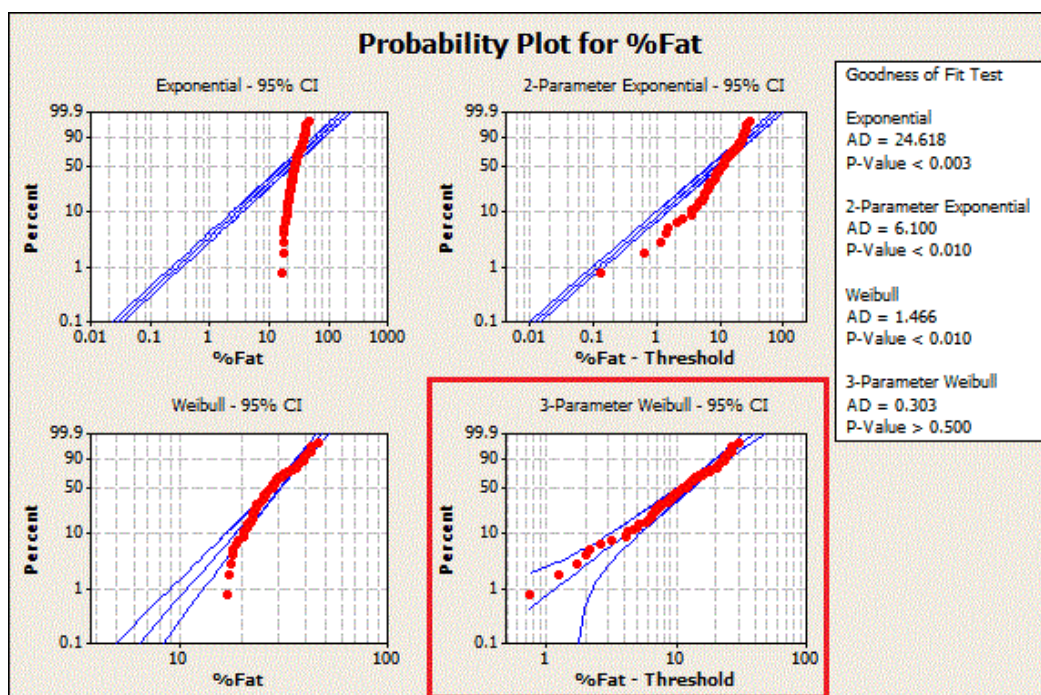
Slika 5.1 Identifikacija statističkih distribucija u programu Minitab 16 [61]

Nakon pokretanja analize, programski paket izračunava parametre izabranih distribucija te prikazuje rezultate analize u analitičkom i grafičkom obliku, kako je prikazano na slikama 5.2 i 5.3.

Goodness of Fit Test

| Distribution               | AD           | P                | LRT          | P |
|----------------------------|--------------|------------------|--------------|---|
| Normal                     | 1.197        | <0.005           |              |   |
| Box-Cox Transformation     | 0.406        | 0.345            |              |   |
| Lognormal                  | 0.406        | 0.345            |              |   |
| 3-Parameter Lognormal      | 0.331        | *                | 0.486        |   |
| Exponential                | 24.618       | <0.003           |              |   |
| 2-Parameter Exponential    | 6.100        | <0.010           | 0.000        |   |
| Weibull                    | 1.466        | <0.010           |              |   |
| <b>3-Parameter Weibull</b> | <b>0.303</b> | <b>&gt;0.500</b> | <b>0.000</b> |   |
| Smallest Extreme Value     | 2.954        | <0.010           |              |   |
| Largest Extreme Value      | 0.321        | >0.250           |              |   |
| Gamma                      | 0.594        | 0.135            |              |   |
| 3-Parameter Gamma          | 0.308        | *                | 0.097        |   |
| Logistic                   | 1.106        | <0.005           |              |   |
| Loglogistic                | 0.513        | 0.153            |              |   |
| 3-Parameter Loglogistic    | 0.393        | *                | 0.303        |   |
| Johnson Transformation     | 0.268        | 0.677            |              |   |

Slika 5.2 Analitički rezultati dobiveni pomoću programskog paketa Minitab 16



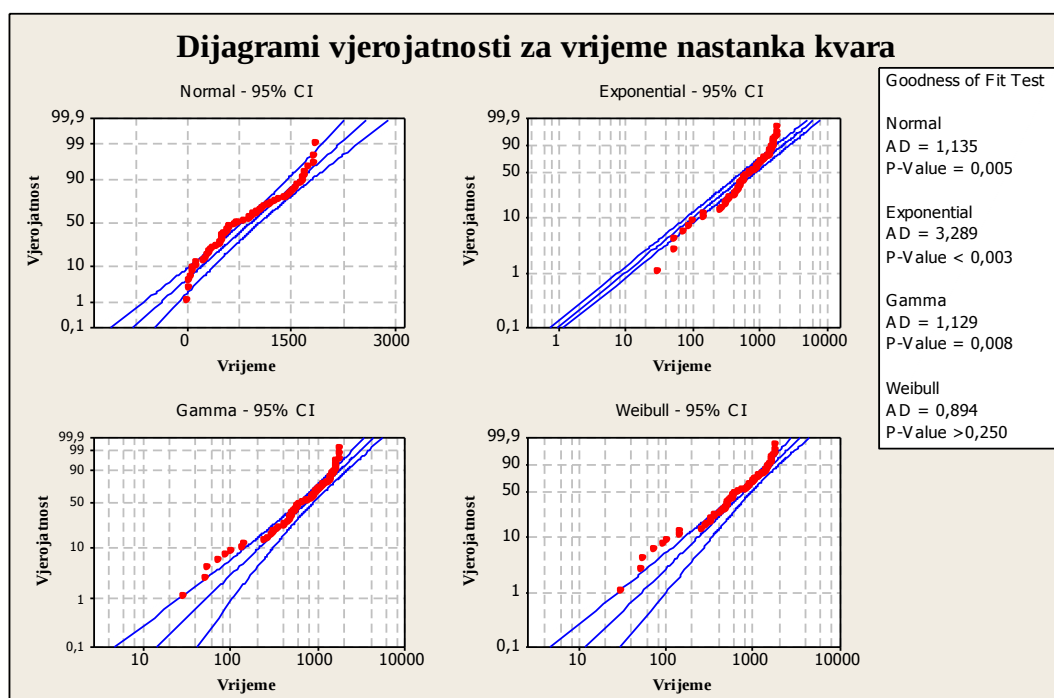
Slika 5.3 Grafički prikaz rezultata analize pomoću programskog paketa Minitab 16

Kriteriji za izbor „najbolje distribucije“ od 16 ponuđenih statističkih distribucija su sljedeći:

- najmanja vrijednost parametra AD testa,
- veća vrijednost  $p$  parametra (Pearsonov koeficijent korelacije), koji mora biti veći od 0,05 (prag signifikantnosti).

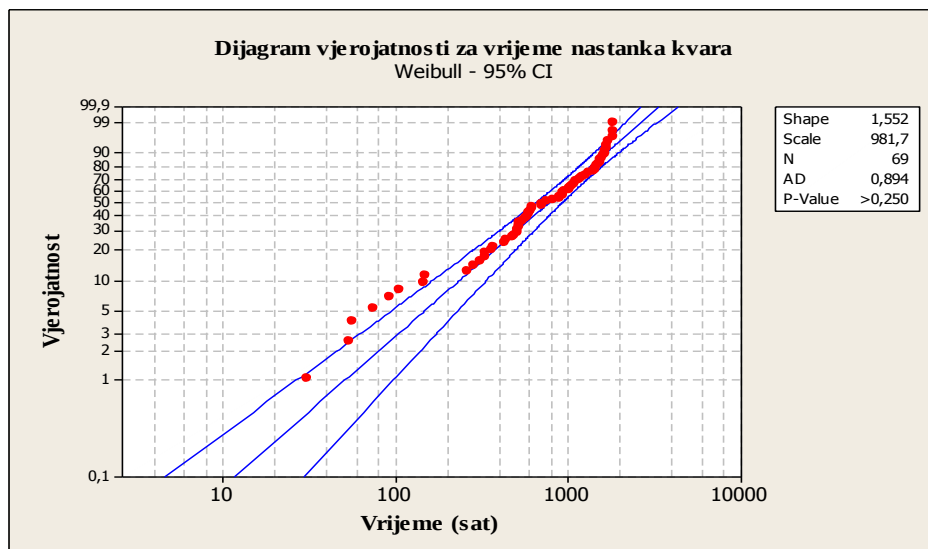
U konkretnom primjeru prikazanom na slikama 5.2 i 5.3 parametri iznose  $AD = 0,303$  i  $p > 0,5$ , i zato je 3-parametarska Weibullova distribucija izabrana kao distribucija koja najbolje opisuje empirijski dobivene podatke.

Ulazni podaci uzeti su iz tablice 4.3 gdje su dati empirijski, kumulativni podaci kvarova brodskog dizelskog motora M 504 B2. Kriteriji na temelju kojeg će se prihvatiti ili odbaciti postavljena hipoteza prethodno su navedeni, a to su najmanja vrijednost parametra AD testa i vrijednost  $p$  parametra veća od 0,05. Slijedom navedenog na slici 5.4 prikazani su rezultati testiranja na empirijskoj funkciji pouzdanosti  $R_e(t)$ .



Slika 5.4 Usporedni test statističkih distribucija (normalna, eksponencijalna, gama i Weibullova)

Rezultati testiranja prikazani na slici 3.18 pokazuju da Weibullova distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju pouzdanosti  $R_e(t)$ , jer je jedino tada parametar  $p > 0,05$ . Konkretno rezultati pokazuju da je  $p > 0,250$ . Na slici 5.5 prikazani su izračunati parametri Weibullove distribucije, i to parametar oblika (shape), koji iznosi  $\beta = 1,552$  i parametar razmjere (scale), koji iznosi  $\eta = 981,7$  sati.



Slika 5.5 Vrijednosti parametara Weibullove distribucije

Slijedom rezultata prikazanih na slikama 5.4 i 5.5 u nastavku su prikazani zbirni podaci: za jakost testa, parametri pojedinih distribucija i vrijednost srednjeg vremena između kvara MTBF.

## Goodness of Fit Test

| Distribution | AD    | P      |
|--------------|-------|--------|
| Normal       | 1,135 | 0,005  |
| Exponential  | 3,289 | <0,003 |
| Gamma        | 1,129 | 0,008  |
| Weibull      | 0,894 | >0,250 |

## ML Estimates of Distribution Parameters

| Distribution | Location  | Shape   | Scale     | Threshold |
|--------------|-----------|---------|-----------|-----------|
| Normal*      | 888,93768 |         | 552,36601 |           |
| Exponential  |           |         | 888,93767 |           |
| Gamma        |           | 1,78285 | 498,60590 |           |
| Weibull      |           | 1,55200 | 981,68183 |           |

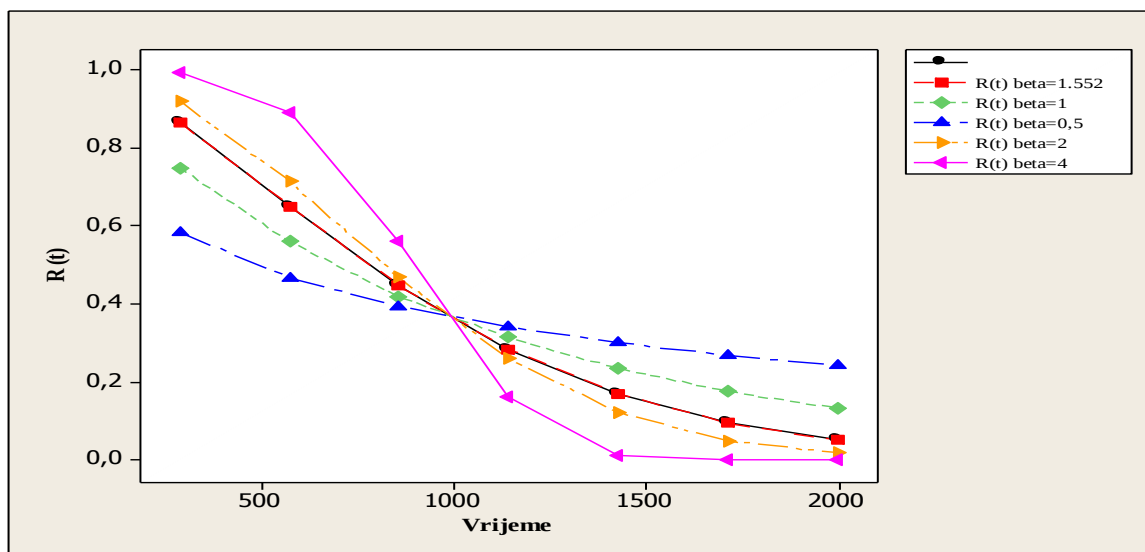
## Descriptive Statistics

| N  | N* | Mean    | StDev   | Median | Minimum | Maximum |
|----|----|---------|---------|--------|---------|---------|
| 69 | 0  | 888,938 | 552,366 | 780    | 31,15   | 1900    |

Srednje vrijeme između kvara MTBF iznosi 888,938 sati, a temeljem relacije (4.25) može se izračunati očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  i ono iznosi:

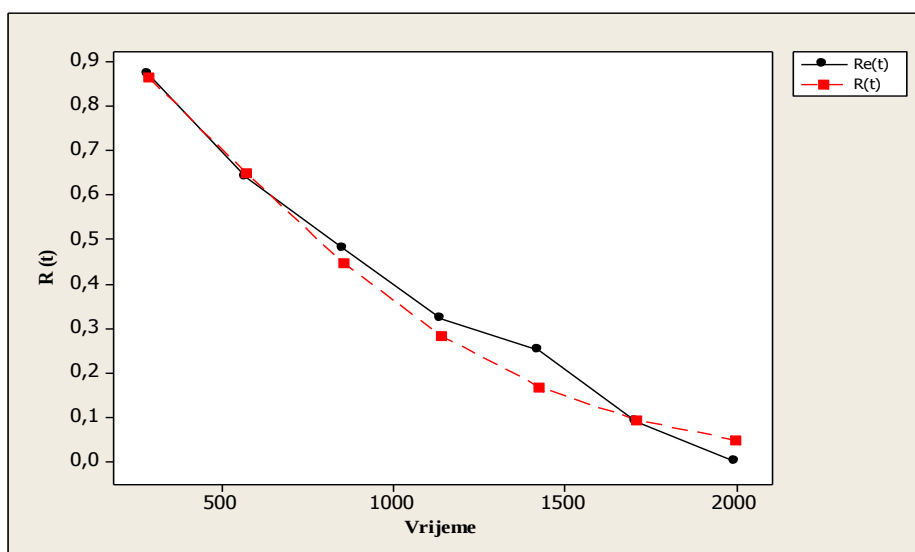
$$E(T) = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) = 0 + 981,7 \cdot \Gamma\left(\frac{1}{1,552} + 1\right) = 981,7 \cdot \Gamma(1,644) = 981,7 \cdot 0,89882 = 882,37h$$

Na slici 5.6 prikazane su funkcije pouzdanosti  $R(t)$  za različite vrijednosti parametra  $\beta$ .



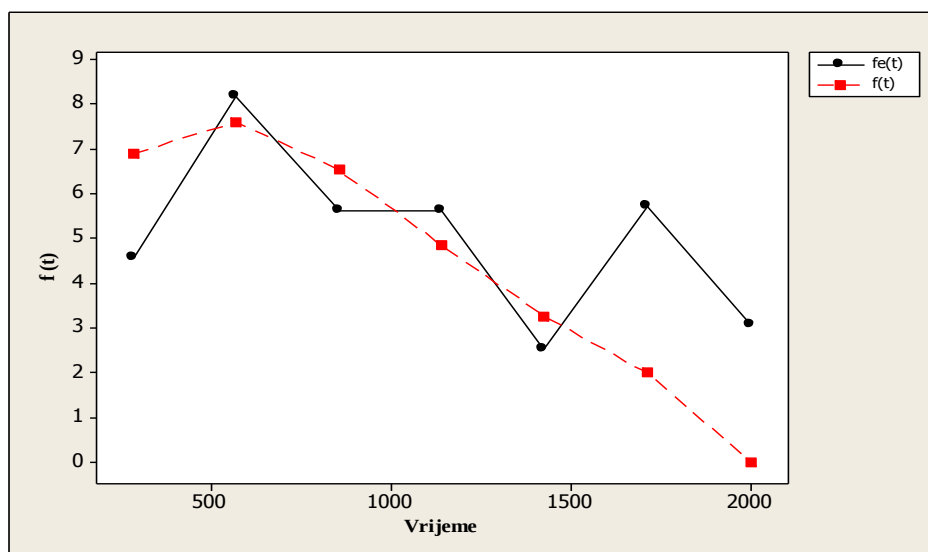
Slika 5.6 Funkcije pouzdanosti  $R(t)$  za različite parametre  $\beta$

Na slici 5.7 prikazan je usporedni dijagram funkcije pouzdanosti  $R(t)$  dobivene na temelju aproksimacije pomoću Weibullove distribucije i empirijske funkcije pouzdanosti  $R_e(t)$ .



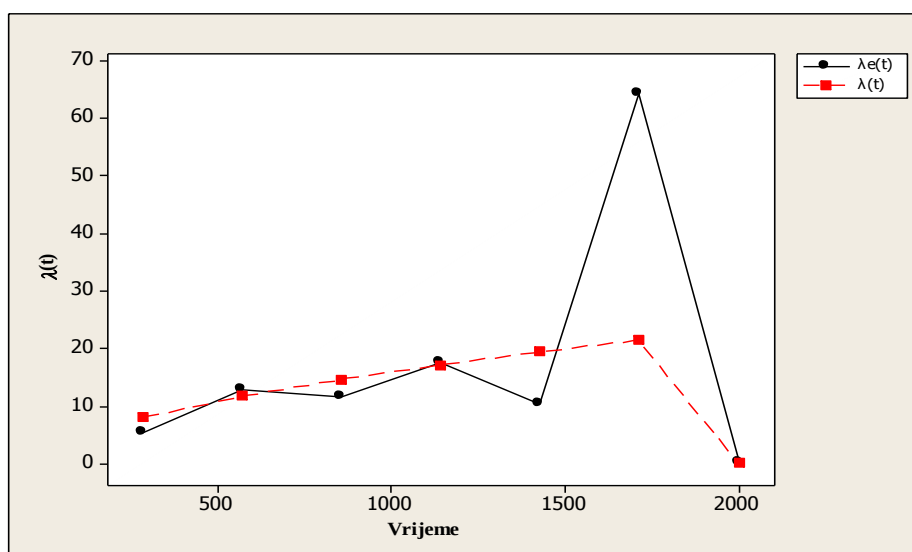
Slika 5.7 Usporedni dijagram funkcije pouzdanosti  $R(t)$

Na slici 5.8 prikazan je usporedni dijagram funkcije gustoće kvara  $f(t)$ .



Slika 5.8 Usporedni dijagram funkcije gustoće kvara  $f(t)$

Na slici 5.9 prikazan je usporedni dijagram funkcije intenziteta kvara  $\lambda(t)$ .



Slika 5.9 Usporedni dijagram funkcije intenziteta kvara  $\lambda(t)$

Na temelju rezultata testiranja postavljene hipoteze može se zaključiti:

- da Weibullova distribucija, u odnosu na ostale distribucije, najbolje opisuje empirijsku distribuciju kvarova brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora opisanu uzorkom danim u tablici 4.3;
- da je potvrđena hipoteza da Weibullova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2, odnosno
- da se očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora može dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara (MTBF), tj. vrijedi da je  $E(T) = \text{MTBF}$ , ako se funkcija gustoće kvara ravna prema Weibullovoj distribuciji što je dokazano empirijskim istraživanjem motora M 504 B2.

Rezultati testiranja postavljene hipoteze istovremeno ukazuju postojanje odstupanja po pojedinim intervalima aproksimacije; stoga je potrebno aproksimirati i testirati hipotezu po prethodno definiranim podsustavima motora M 504 B2.

## 5.2 Aproksimacija i testiranje po podsustavima

Kako je navedeno u točki 4.2, evidentirano je 69 kvarova na deset različitih podsustava: turbopuhalo (A11116), prekretna spojka (A11113), cilindarski blok (A11115), klipna grupa (A11116), blok-pumpa goriva (A11119), regulator brzine vrtnje s pogonom (A11113), ispušni vod (A11114), ubrizgač goriva (A11124), pumpa visokog tlaka goriva (A11125) i sklopovi sustava za upućivanje (A11127). U tablici 5.1 prikazan je broj kvarova motora M 504 B2 po podsustavima.

Tablica 5.1 Prikaz kvarova po podsustavima motora M 504 B2

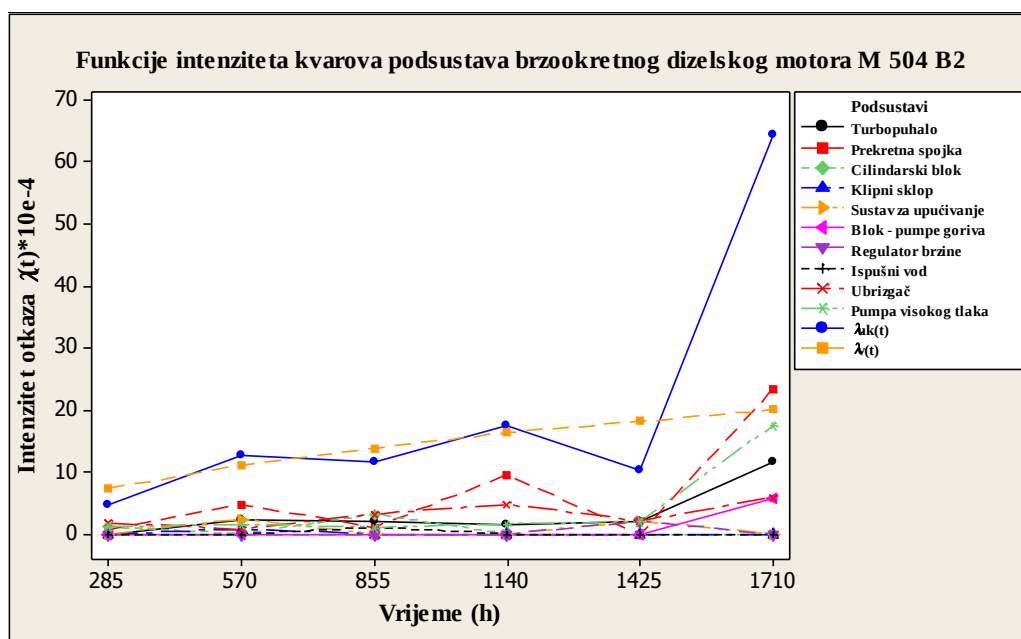
| BROJ KVAROVA PO PODSUSTAVIMA BRZOOKRETNOG DIZELSKOG MOTORA M 504 B2 |             |                    |                     |              |                            |                      |                            |             |          |                                  |           |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|---------------------|--------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|-------------|----------|----------------------------------|-----------|
| Vrijeme<br>$\Delta t_j$                                             | TURBOPUHALO | PREKRETN<br>SPOJKA | CILINDARSKI<br>BLOK | KLIPNI SKLOP | SUSTAV<br>ZA<br>UPUĆIVANJE | BLOK-PUMPA<br>GORIVA | REGULATOR<br>BRZINE VRTNJE | ISPUŠNI VOD | UBRIZGAČ | PUMPA<br>VISOKOG<br>TLAKA GORIVA | UKUPNO    |
| 0-285                                                               | 0           | 1                  | 2                   | 0            | 0                          | 0                    | 0                          | 1           | 3        | 2                                | 9         |
| 285-570                                                             | 3           | 6                  | 0                   | 1            | 3                          | 0                    | 0                          | 0           | 1        | 2                                | 16        |
| 570-855                                                             | 2           | 1                  | 3                   | 0            | 0                          | 0                    | 0                          | 1           | 3        | 1                                | 11        |
| 855-1140                                                            | 1           | 6                  | 0                   | 0            | 0                          | 0                    | 0                          | 0           | 3        | 1                                | 11        |
| 1140-1425                                                           | 1           | 0                  | 0                   | 0            | 1                          | 0                    | 1                          | 0           | 1        | 1                                | 5         |
| 1425-1710                                                           | 2           | 4                  | 0                   | 0            | 0                          | 1                    | 0                          | 0           | 1        | 3                                | 11        |
| 1710-2000                                                           | 3           | 0                  | 1                   | 0            | 0                          | 0                    | 0                          | 1           | 0        | 1                                | 6         |
| <b>Ukupno</b>                                                       | 12          | 18                 | 6                   | 1            | 4                          | 1                    | 1                          | 3           | 12       | 11                               | <b>69</b> |

Detaljna analiza podataka o kvarovima utvrđenim istraživanjem pokazuje sljedeće, prilog 2:

- *Turbopuhalo* – ukupno 12 kvarova; (3) kvara nastala su na vijku za regulaciju turbopuhala, (2) kvara nastala su na rotoru turbopuhala, labirintu te kućištu turbopuhala, (1) kvar nastao je na regulacijskom ventilu, usmjerivaču plinova i na brtvi turbopuhala.
- *Spojka* – ukupno 18 kvarova; (16) kvarova nastalo je zbog suporta spojke, (2) kvara nastala su na kućištu spojke.
- *Cilindarski blok* – ukupno 6 kvarova; (3) kvara nastala su na bloku cilindra, (1) kvar nastao je uslijed curenja goriva, propuštanja kompresije i zbog emulzije u cilindru.

- *Klipni sklop* – ukupno 1 kvar; nastao zbog oštećenja prstena klipa.
- *Sklop sustava za upućivanje* – ukupno 4 kvara; (3) kvara nastala su uslijed blokiranog uputnog ventila, (1) kvar nastao je zbog loma uputnog ventila.
- *Blok-pumpa goriva* – ukupno 1 kvar; nastao uslijed loma letve za regulaciju dotoka goriva.
- *Regulator brzine vrtnje* – ukupno 1 kvar; nastao uslijed loma opruge.
- *Ispušni vod* – ukupno 3 kvara; (2) kvara nastala su uslijed loma vijka, (1) kvar nastao je zbog propuštanja rashladne emulzije.
- *Ubrizgač goriva* – ukupno 12 kvarova; (11) kvarova nastalo je zbog propuštanja rasprskaa, (1) kvar nastao je uslijed izgaranja rasprskaa.
- *Visokotlačna pumpa* – ukupno 11 kvarova; (9) kvarova nastalo je zbog propuštanja goriva, (2) kvara nastala su uslijed blokiranja mehanizma upravljanja.

Na slici 5.10 prikazane su empirijske funkcije intenziteta kvara  $\lambda_{ei}(t)$  po pojedinom podsustavu i ukupna empirijska funkcija intenziteta kvara  $\lambda_e(t)$ .



Slika 5.10 Funkcije intenziteta kvarova po podsustavima i ukupna funkcija intenziteta kvara

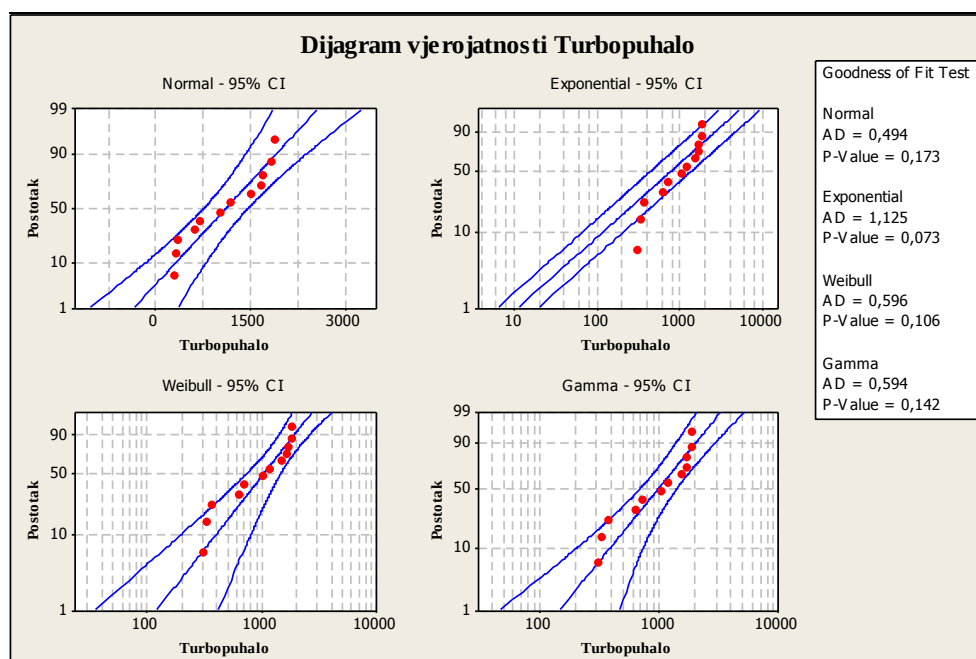
U tablici 5.2 prikazane su vrijednosti empirijske funkcije intenziteta kvarova po pojedinim podsustavima  $\lambda_{ei}(t)$ .

Tablica 5.2 Vrijednosti empirijske funkcije intenziteta kvara po podsustavima

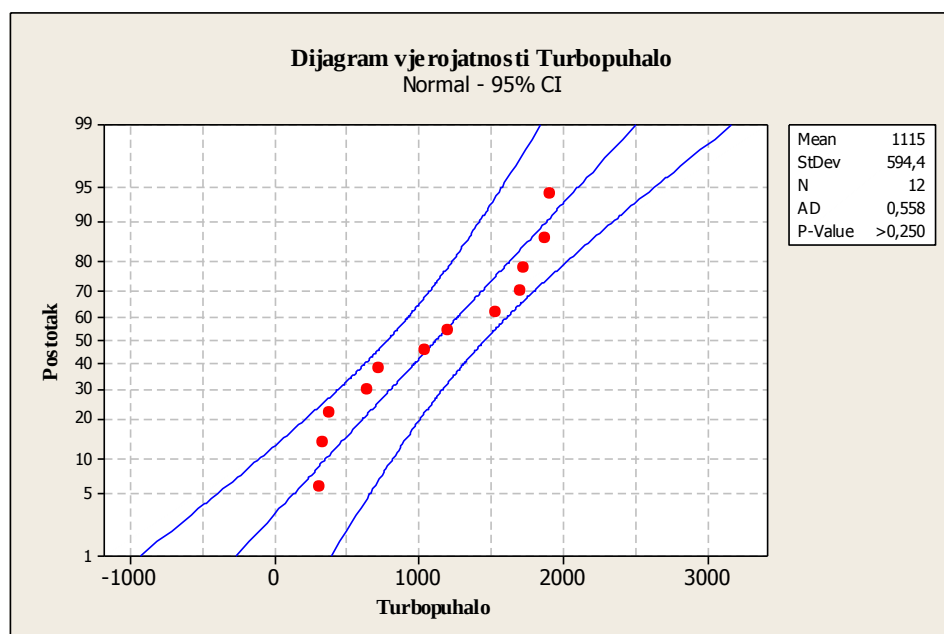
| VRIJEDNOSTI EMPIRIJSKE FUNKCIJE INTENZITETA KVARA PO PODSUSTAVIMA |             |                       |                     |              |                            |                      |                            |             |          |                       |        |                                             |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|-------------|----------|-----------------------|--------|---------------------------------------------|
| Intenzitet kvara                                                  | TURBOPUHALO | PREKRETNOST<br>SPOJKA | CILINDARSKI<br>BLOK | KLIPNI SKLOP | SUSTAV<br>ZA<br>UPUĆIVANJE | BLOK-PUMPA<br>GORIVA | REGULATOR<br>BRZINE VRTNJE | ISPUŠNI VOD | UBRIZGAČ | VISOKOTLAČNA<br>PUMPA | UKUPNO | Intenzitet<br>kvara<br>$\lambda_y(t)$ 10e-4 |
| 9/(60*285)                                                        | 0,00        | 0,58                  | 1,17                | 0,00         | 0,00                       | 0,00                 | 0,00                       | 0,00        | 1,75     | 1,17                  | 4,67   | 7,35                                        |
| 16/(44*285)                                                       | 2,39        | 4,78                  | 0,00                | 0,79         | 2,39                       | 0,00                 | 0,00                       | 0,00        | 0,79     | 1,59                  | 12,73  | 11,03                                       |
| 11/(33*285)                                                       | 2,13        | 1,06                  | 3,19                | 0,00         | 0,00                       | 0,00                 | 0,00                       | 1,06        | 3,19     | 1,06                  | 11,69  | 13,74                                       |
| 11/(22*285)                                                       | 1,59        | 9,57                  | 0,00                | 0,00         | 0,00                       | 0,00                 | 0,00                       | 0,00        | 4,78     | 1,59                  | 17,53  | 16,38                                       |
| 5/(17*285)                                                        | 2,06        | 0,00                  | 0,00                | 0,00         | 2,06                       | 0,00                 | 2,06                       | 0,00        | 2,06     | 2,06                  | 10,30  | 18,14                                       |
| 11/(6*285)                                                        | 11,69       | 23,39                 | 0,00                | 0,00         | 0,00                       | 5,85                 | 0,00                       | 0,00        | 5,85     | 17,54                 | 64,32  | 20,02                                       |
| 6/(0*285)                                                         | 0,00        | 0,00                  | 0,00                | 0,00         | 0,00                       | 0,00                 | 0,00                       | 0,00        | 0,00     | 0,00                  | 0,00   | 21,77                                       |
|                                                                   | 19,86       | 39,38                 | 4,36                | 0,79         | 4,45                       | 5,85                 | 2,06                       | 1,06        | 18,42    | 25,01                 | 121,24 |                                             |

Ponovnim korištenjem programskog paketa Minitab 16 identificirane su distribucije koje najbolje aproksimiraju funkcije pouzdanosti podsustava brzoekretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2.

Na slici 5.11 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *turbopuhala*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti turbopuhala prema rezultatima testiranja je normalna distribucija.



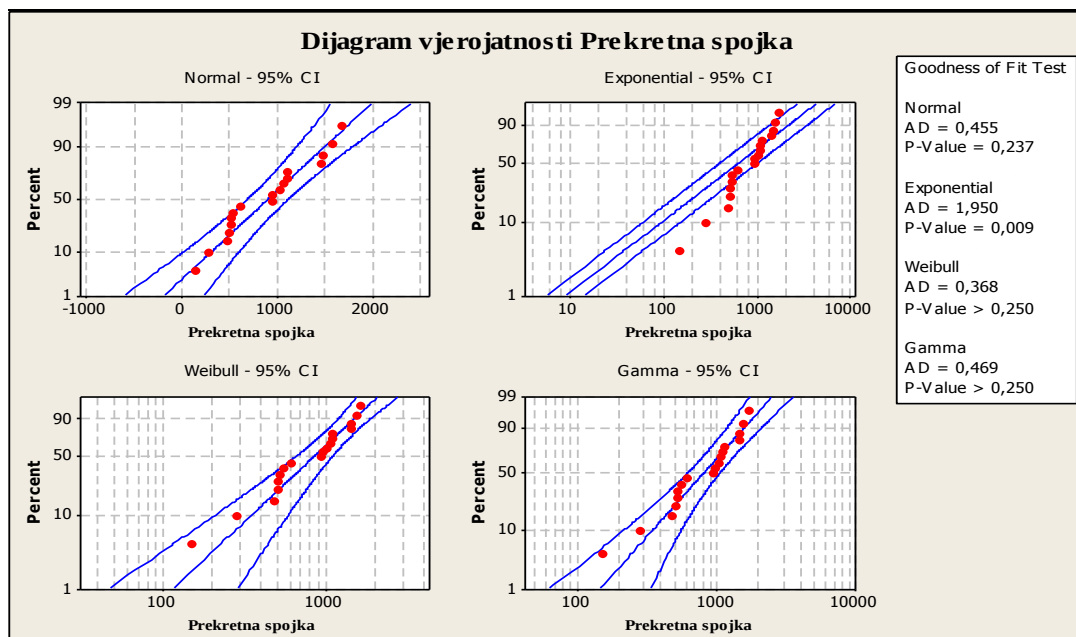
(a)



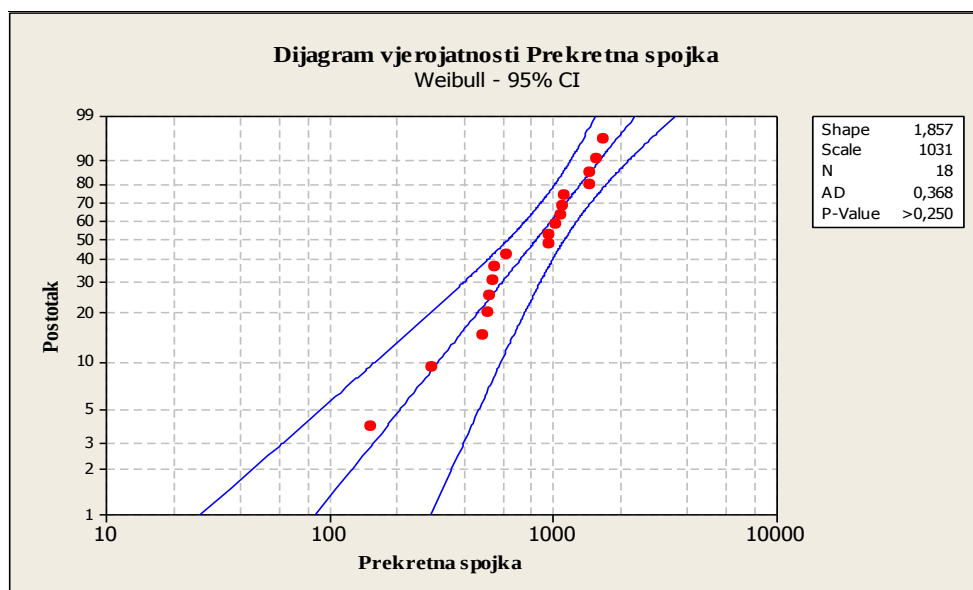
(b)

Slika 5.11 Funkcija pouzdanosti turbopuhala

Na slici 5.12 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *prekretne spojke*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti *prekretne spojke* prema rezultatima testiranja je Weibullova distribucija.



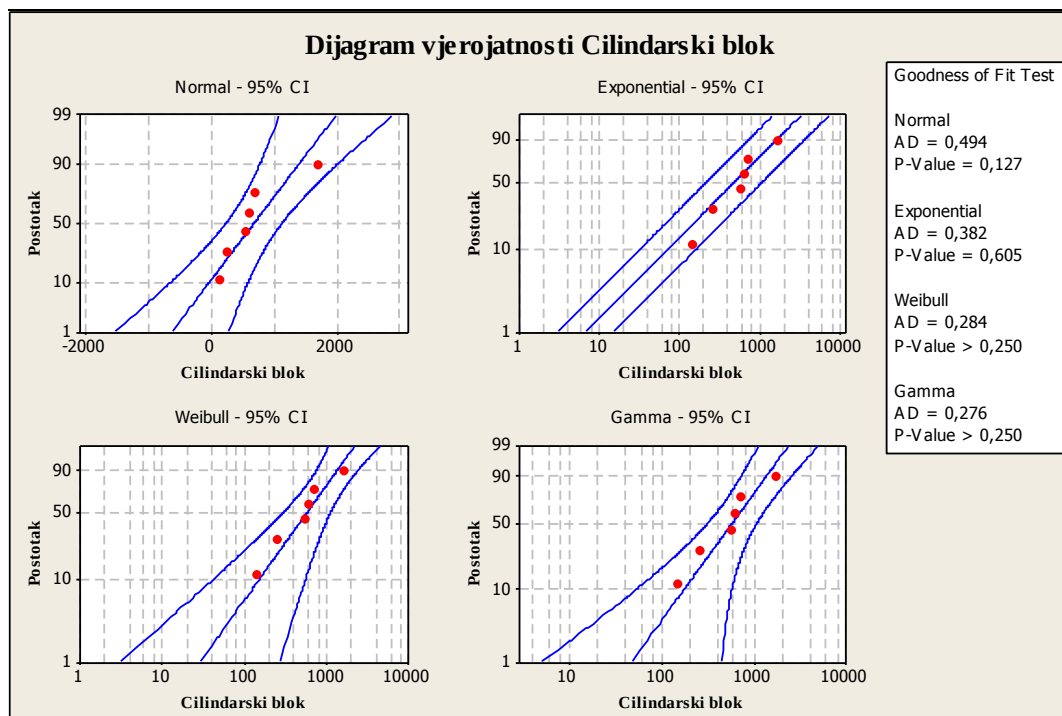
(a)



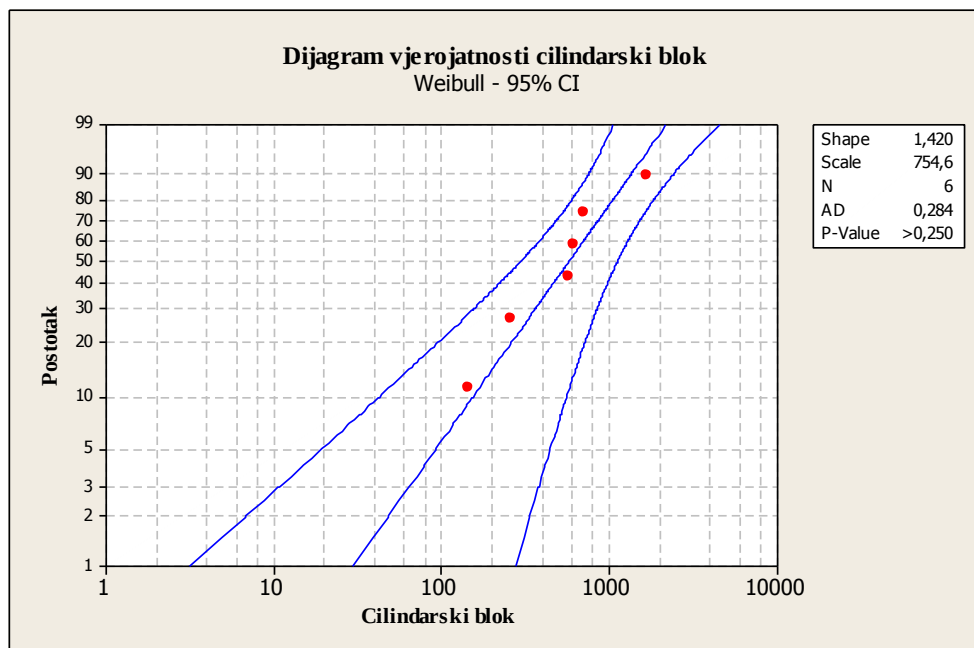
(b)

Slika 5.12 Funkcija pouzdanosti *prekretne spojke*

Na slici 5.13 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *cilindarskog bloka*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti cilindarskog bloka prema rezultatima testiranja je Weibullova distribucija.



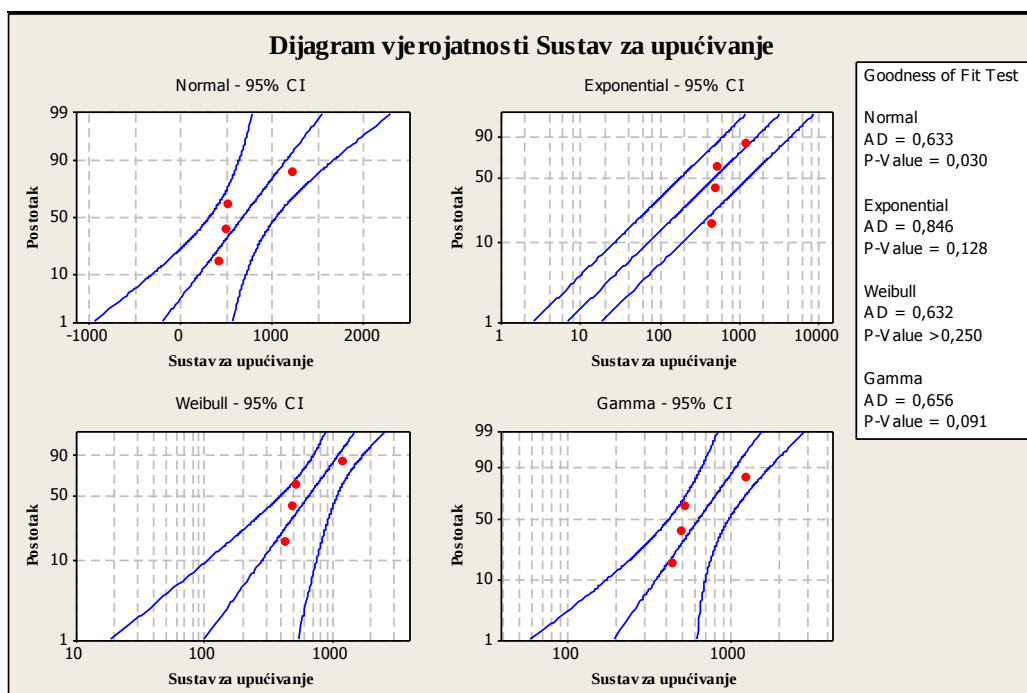
(a)



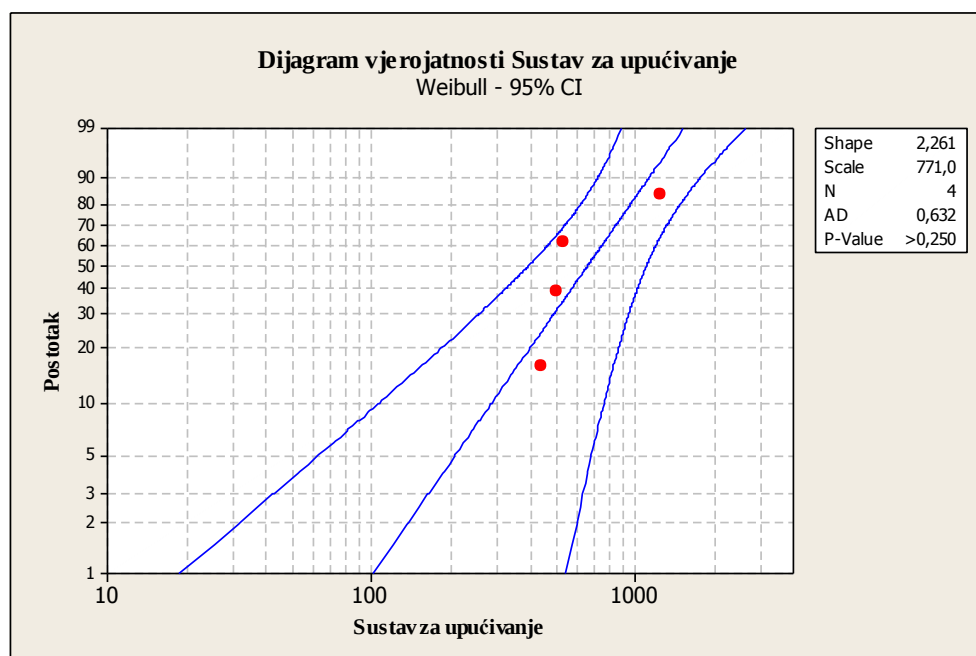
(b)

Slika 5.13 Funkcija pouzdanosti cilindarskog bloka

Na slici 5.14 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti sustava za upućivanje, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti sklopova sustava za upućivanje prema rezultatima testiranja je Weibullova distribucija.



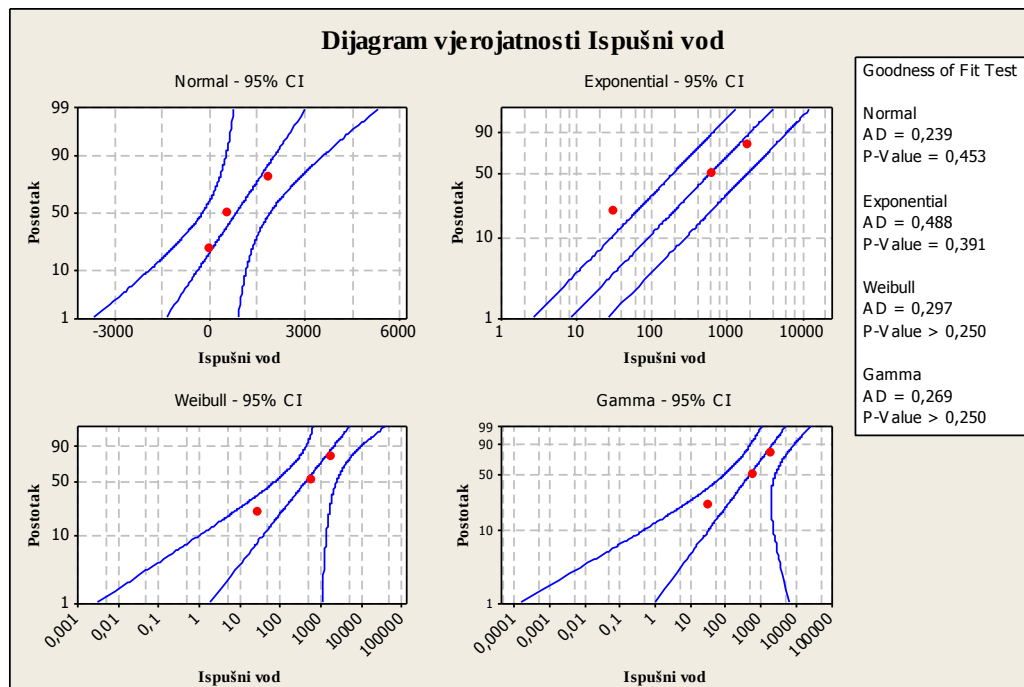
(a)



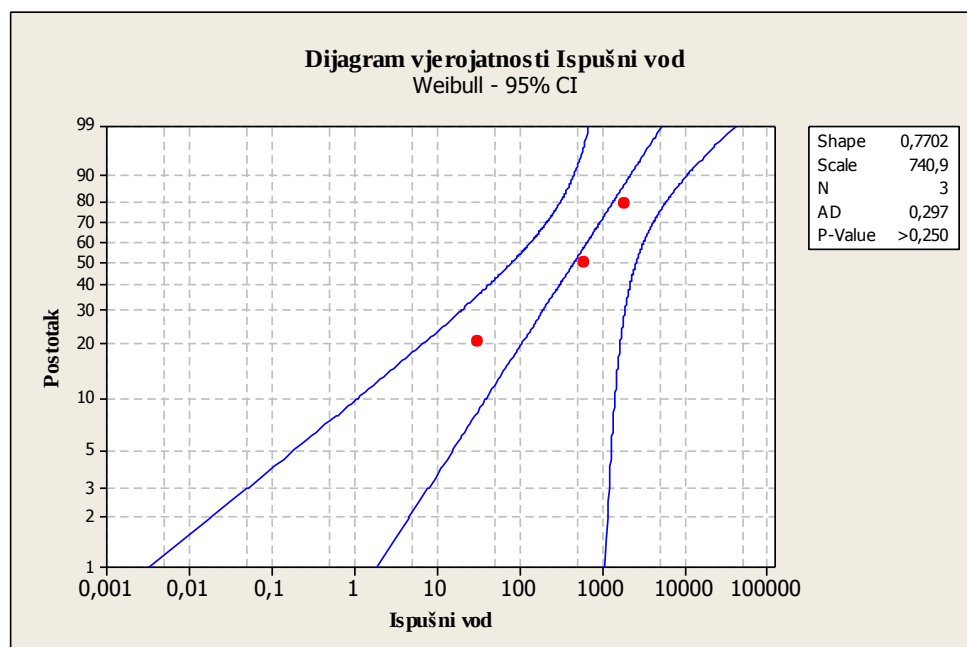
(b)

Slika 5.14 Funkcija pouzdanosti sklopova sustava za upućivanje

Na slici 5.15 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *ispušnog voda*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti ispušnog voda prema rezultatima testiranja je Weibullova distribucija.



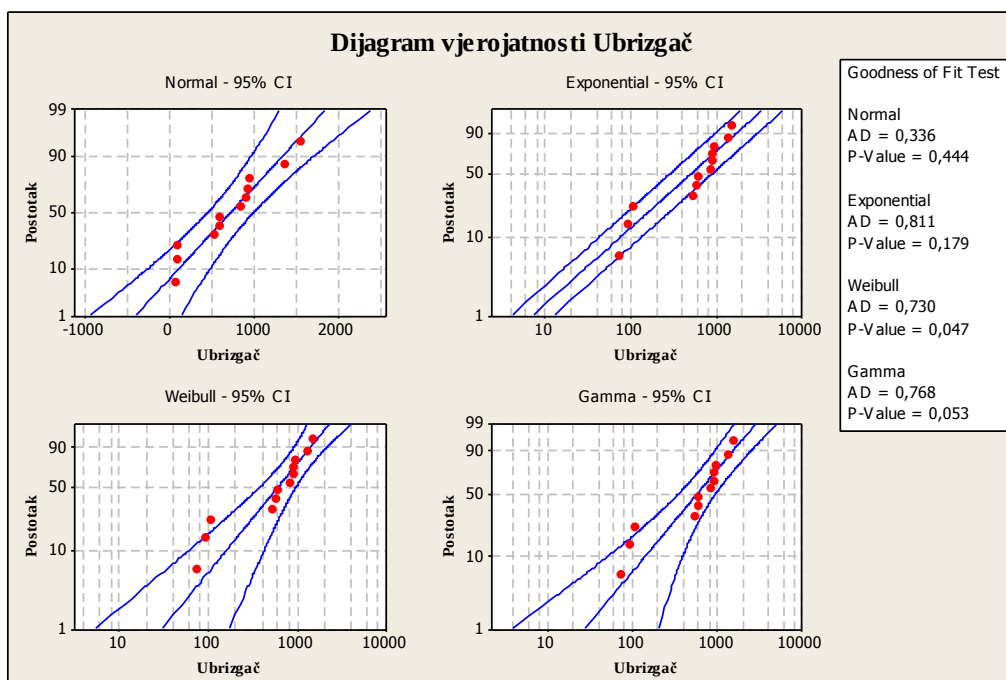
(a)



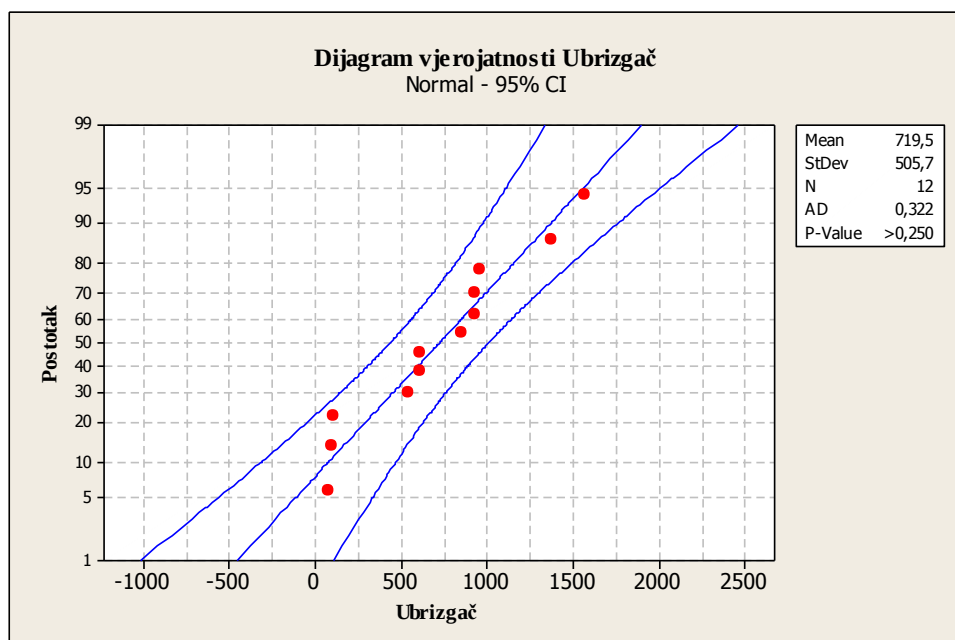
(b)

Slika 5.15 Funkcija pouzdanosti ispušnog voda

Na slici 5.16 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *ubrizgača*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti ubrizgača prema rezultatima testiranja je normalna distribucija.



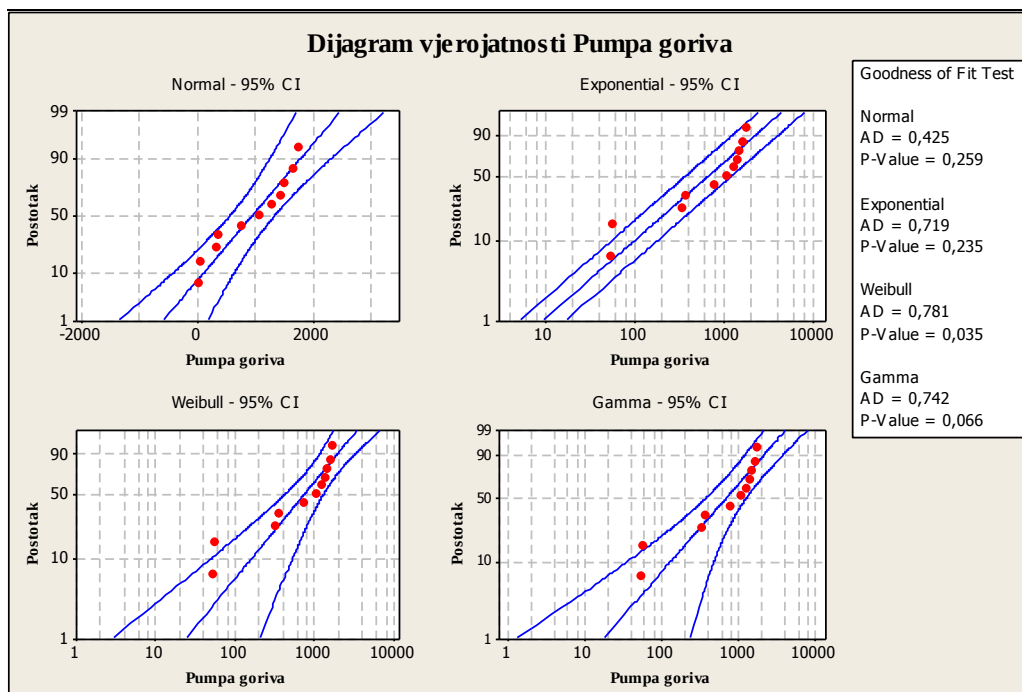
(a)



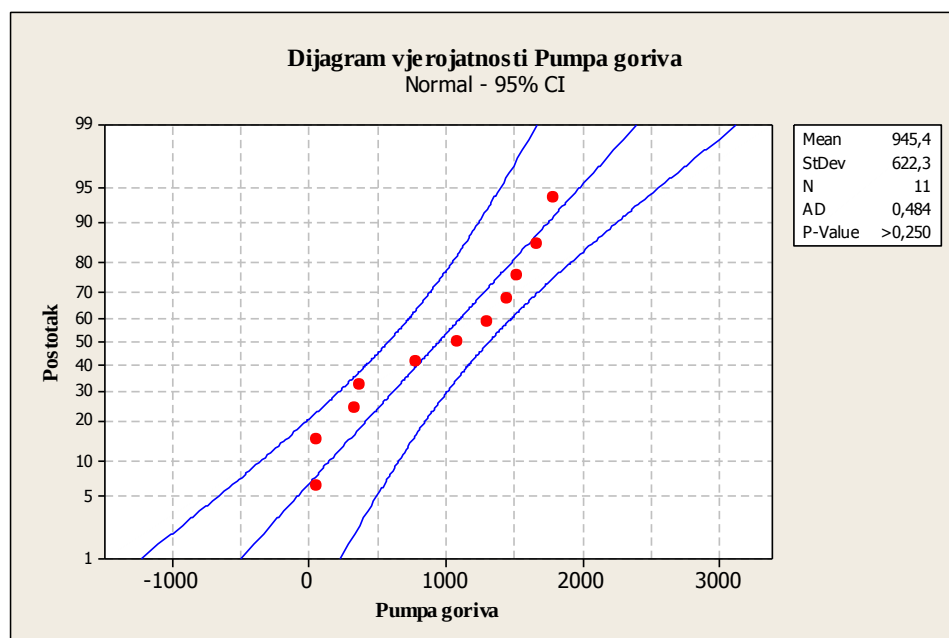
(b)

Slika 5.16 Funkcija pouzdanosti ubrizgača

Na slici 5.17 (a) i (b) prikazana je aproksimacija funkcije pouzdanosti *visokotlačne pumpe goriva*, a distribucija koja najbolje aproksimira funkciju pouzdanosti visokotlačne pumpe goriva prema rezultatima testiranja je normalna distribucija.



(a)



(b)

Slika 5.17 Funkcija pouzdanosti visokotlačne pumpe goriva

Podsustavi brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2: klipni sklop, blok-pumpa goriva i regulator brzine tijekom provedenog istraživanja imali su po jedan kvar, stoga nije moguće aproksimirati funkciju pouzdanosti tih podsustava. Na temelju prezentiranih podataka može se zaključiti da, iako se funkcija pouzdanosti motora M 504 B2 ravna prema Weibullovoj distribuciji, svi podsustavi se ne ravnaju po istoj distribuciji, već prema Weibullovoj i normalnoj distribuciji.

Važno je stoga završno naglasiti:

1. Kada se pojavljivanje kvarova ravna prema Weibullovoj distribuciji to znači da se kvarovi ne pojavljuju slučajno, kao što bi bio slučaj u eksponencijalnoj distribuciji, a uzroci kvara motora mogu biti: preopterećenja motora, zamor materijala, značajno habanje dijelova motora, korozija ili ljudski čimbenik.
2. Kada se pojavljivanje kvarova ravna prema normalnoj distribuciji tada dolazi do postupnog starenja sustava u tijeku uporabe, tj. javlja se istrošenost dijelova podsustava.

Stoga će se u sljedećem poglavlju analizirati pogodnost održavanja odnosno „popravljivost brzookretnog dizelskog motora M 504 B2“ s obzirom na utvrđenu karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti za koju je dokazano da se najbolje ravna prema Weibullovoj distribuciji, uzimajući u obzir da se pojedini podsustavi motora ravnaju prema Weibullovoj i normalnoj distribuciji.



## 6. NUMERIČKI MODEL I OPTIMIZACIJA EKSPLOATACIJSKE

### POUZDANOSTI ISTRAŽIVANIH POGONSKIH MOTORA RTOP-a

Poznata je činjenica da je metodologija istraživanja i predviđanja eksploatacijske pouzdanosti elektroničkih komponenti značajno napredovala, ali to nije slučaj i s mehaničkim komponentama odnosno brodskim propulzijskim sustavima te brodskim pogonskim motorima kakav je i brzookretni radijalni dizelski motor. Za takve sustave uvjetno nazvane „mehaničkim“ karakteristična je njihova složenost, a to znači zastupljenost raznovrsne tehnologije (strojarske, elektroničke, energetske, računalne itd.) u njihovim konstrukcijskim i izvedbenim rješenjima. Predviđanje eksploatacijske pouzdanosti takvog složenog tehničkog sustava predstavljao je znanstveni izazov ove doktorske disertacije, te se upravo u definiranju približnog modela eksploatacijske pouzdanosti očituje njezin izvorni znanstveni doprinos.

#### 6.1 Numerički model pouzdanosti

Temeljna je značajka mehaničkih sustava nemogućnost primjene pretpostavke o konstantnom intenzitetu kvara, tj. da se u matematičkom modeliranju takvih sustava koristi samo jedna razdioba – eksponencijalna razdioba. U literaturi [6], [30] je poznato da se mehanički dijelovi nekog mehaničkog sustava ne kvare s konstantnim intenzitetom kvara u funkciji vremena rada sustava, već je prisutan i beskonačni rast intenziteta kvara u funkciji vremena rada složenog tehničkog sustava. Ova pojava je u najvećoj mjeri uzrokovana habanjem, puzanjem, korozijom materijala i sl., dakle pojavama koje tijekom vremena samo povećavaju vjerojatnost nastanka kvara.

U cilju proučavanja pojave kvara složenih tehničkih sustava potrebno je istražiti ponašanje sastavnih dijelova i podsustava tog sustava tijekom njegove eksploatacije, u konkretnom slučaju brzookretnog brodskog dizelskog motora. Da bismo uspješno istražili eksploatacijsku pouzdanost dizelskog motora, potrebno je njegove podsustave proučavati kroz blok-dijagram pouzdanosti sustava i primarno na način kako je dizelski motor podijelio, tj. podsustave definirao proizvođač odnosno konstruktor brzookretnog dizelskog motora. To je i provedeno u ovoj doktorskoj disertaciji, kako prikazuju slika 4.5 i relacije 4.4 i 4.5.

Zašto je to nužno učiniti odnosno istražiti na takav način? Prije svega jer rezultati istraživanja i empirijski podaci prikupljeni tijekom istraživanja te provedena analiza kvarova služe konstruktorima dizelskih motora i stručnjacima uključenim u održavanje dizelskih motora u pronalasku novih konstrukcijskih i tehnoloških rješenja (u konkretnom slučaju brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora),

da bi se oni manje kvarili i bili sposobni u najtežim operativnim uvjetima ispuniti svoju zadaću. Navedeno je posebno izraženo u sustavu borbene namjene, a borbeni brodovi to svakako jesu.

Nakon što je definiran blok-dijagram pouzdanosti, potrebno je bilo odrediti ukupnu eksploatacijsku pouzdanost sustava (brzookretni radijalni brodski dizelski motor) i njegovih podsustava odnosno komponenti. Praktično to znači na temelju empirijski prikupljenog uzorka statistički odrediti karakteristike vijeka trajanja sustava i podsustava, polazeći od pretpostavke kako vijek trajanja tehničkog sustava koji se ispituje pripada određenoj klasi distribucije kao što je eksponencijalna, Weibullova, normalna, logonormalna, gama i sl.

To je i učinjeno u točki 5, što prikazuju rezultati istraživanja prikazani dijagramima (od slike 5.4 do slike 5.17), korištenjem metode simulacije (model simulacije) definiranom literaturom [6]. Prema literaturi „matematički model simulacije opisuje rad složenog sustava preko pojedinačnih događaja koji se pojavljuju na dijelovima sustava, a simulacija je jedan od oblika slučajnog uzorkovanja na modelu koji pripada istraživanom sustavu“. Primjerice u procesu simulacije pogodnosti održavanja, kako se navodi u spomenutoj literaturi, ulazni parametri simulacije su slučajno promjenljive veličine koje se odnose na vrijeme pojave kvara i vrijeme popravka nastalog kvara. Složeniji modeli simulacije mogu obuhvaćati intenzitet popravaka, potrebne pričuvne dijelove, zastoje uslijed ograničenog broja osposobljenih osoba, stanja opreme za održavanje i sl.

Najčešće se ovakve simulacije danas provode na računalima koristeći specijalizirane računalne pakete, a u okviru ove disertacije u svrhu statističke analize empirijskih podataka korišten je računalni paket Minitab 16.

Glavni nedostatak korištenja ovakvog oblika simulacije odnosi se na veličinu uzorka, tj. vjerodostojnost testiranja postavljenih hipoteza; općenito vrijedi: što je veći uzorak zaključivanje je vjerodostojnije. Konkretno u ovoj doktorskoj disertaciji korišten je Anderson-Darling test koji se može primijeniti na testiranje posebno malih uzoraka ( $n_{\min}=3$ ), kako je i navedeno u literaturi [17], [18]. Bez obzira na navedenu činjenicu, u slučaju kad se radi o malom uzorku, model pouzdanosti može biti i je samo približan. Daljnja istraživanja uz povećanje uzorka mogu učvrstiti rezultate koji su prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji.

Temeljem prethodno navedenog, a uzimajući u obzir prije navedena ograničenja, rezultati istraživanja provedenog u sklopu ove doktorske disertacije na uzorku od šest brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora M 504 B2 i 69 kvarova, koji su evidentirani tijekom 2000 radnih sati, pokazali su:

Funkcija pouzdanosti istraživanih složenih tehničkih sustava glasi:

$$R_{motora} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} = e^{-\left(\frac{t}{981,7}\right)^{1.552}} \quad (6.1)$$

Funkcija intenziteta kvara glasi:

$$\lambda_{motora} = \frac{1.552}{981,7} * \left(\frac{t}{981,7}\right)^{1.552} \quad (6.2)$$

Prema tome za očekivano vrijeme bez kvara  $E(T)$ , koje prema relaciji 4.25 iznosi 882,37 h, razina pouzdanosti motora iznosi 43 % jer je:

$$R_{882,37h} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} = e^{-\left(\frac{882,37}{981,7}\right)^{1.552}} = 0,427 \quad (6.3)$$

Ukoliko zahtijevana razina pouzdanosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2 iznosi 85 %, tada je očekivano vrijeme bez kvara motora M 504 B2 na temelju relacije 3.25 jednako:

$$T = 300h$$

Rezultati dobiveni temeljem relacija 3.27, 3.28 i 3.29 predstavljaju izvorne podatke u pogledu izračunatih parametara, dobivene temeljem provedenog empirijskog istraživanja eksploatacijske pouzdanosti brzookretnih radijalnih dizelskih motora.

## 6.2 Optimizacija eksploatacijske pouzdanosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2

Operativnom uporabom materijalnih sredstava u HRM-u, moguća su tri stanja pripravnosti i brzine reakcije ljudi i ratnih brodova. Definirana stanja određuju razine spremnosti i pouzdanosti svih elemenata uključenih u procese odgovora na moguće izazove. Zahtijevane razine operativne sposobnosti su:

- puna operativna sposobnost,
- ograničena operativna sposobnost,
- minimalna operativna sposobnost.

Optimizacija eksploatacijske pouzdanosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora usko je vezana, tj. potpuno određena zahtijevanim razinama operativnih sposobnosti.

Tablicom 6.1 prikazani su kvarovi podsustava brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2, podijeljeni prema vremenima nastanka kvarova, a prikupljeni tijekom provedenog istraživanja eksploatacijske pouzdanosti.

Isto tako u tablici 6.1 definirani su vremenski intervali u kojima istraživani sustav, temeljem empirijskih podataka, dostiže razine pouzdanosti od 0,85, 0,50 i 0,25, odnosno intervali koji određuju razinu operativne sposobnosti.

Istraženi su kvarovi s obzirom na vrstu i vrijeme javljanja, i to za različite razine pouzdanosti motora koje su definirane zahtijevanom pouzdanošću borbenog sustava. Tako za punu operativnu sposobnost zahtijevana razina pouzdanosti je 0,85 i brzookretni radijalni brodski dizelski motor M 504 B2 zadržava navedenu razinu pouzdanosti u prvih 300 sati rada pri održavanju prema preporuci proizvođača motora. Sljedeći prag pouzdanosti istraživanog sustava definiran parametrom operativne sposobnosti je 0,50, koji implicira ograničenu operativnu sposobnost borbenog sustava i dostiže se nakon 775 sati rada brzookretnog radijalnog broskog dizelskog motora M 504 B2. Posljednji prag pouzdanosti od 0,25, a koji osigurava minimalnu operativnu sposobnost, motor dostiže nakon 1200 sati rada.

Tablica 6.1 Kvarovi podsustava motora M 504 B2

| Podsustav                  | Mjesto kvara                      | $\Sigma$ kvarova do t 300 h | $\Sigma$ kvarova do t 775 h | $\Sigma$ kvarova do t 1200 h | $\Sigma$ kvarova do t 2000 h |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Turbopuhalo                | Rotor                             | 0                           | 0                           | 1                            | 2                            |
|                            | Regulacijski ventil               | 0                           | 0                           | 1                            | 1                            |
|                            | Labirint                          | 0                           | 1                           | 1                            | 2                            |
|                            | Usmjerivači plinova               | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Brтва                             | 0                           | 0                           | 0                            | 1                            |
|                            | Vijak za regulaciju               | 0                           | 3                           | 3                            | 3                            |
|                            | Kučiste                           | 0                           | 0                           | 0                            | 2                            |
| Prekretna Spojka           | Suport spojke                     | 1                           | 7                           | 13                           | 16                           |
|                            | Kučiste spojke                    | 1                           | 1                           | 1                            | 2                            |
| Cilindarski blok           | Curenje goriva                    | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Propuštanje kompresije            | 1                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Emulzija u cilindru               | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Propuštanje goriva bloka cilindra | 1                           | 2                           | 2                            | 3                            |
| Klipni sklop               | Oštećenje klipa                   | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
| Sustav za upućivanje       | Lom uputnog ventila               | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Blokiran uputni ventil            | 0                           | 2                           | 2                            | 3                            |
| Blok-pumpa goriva          | Letva goriva                      | 0                           | 0                           | 0                            | 1                            |
| Regulator brzine vrtnje    | Lom opruge regulatora             | 0                           | 0                           | 0                            | 1                            |
| Ispušni vod                | Propuštanje emulzije              | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Puknuće vijka                     | 1                           | 1                           | 1                            | 2                            |
| Ubrizgač                   | Izgorio rasprskič                 | 1                           | 1                           | 1                            | 1                            |
|                            | Procurio rasprskič                | 2                           | 5                           | 8                            | 10                           |
| Pumpa visokog tlaka goriva | Propuštanje goriva                | 2                           | 3                           | 6                            | 10                           |
|                            | Blokiran mehanizam upravljanja    | 0                           | 1                           | 1                            | 1                            |
| Ukupan broj kvarova do t   |                                   | 10                          | 35                          | 49                           | 69                           |

$$R_{300} = 0,85 \quad R_{775} = 0,50 \quad R_{882,37} = 0,43 \quad R_{1200} = 0,25$$

Optimizacija pouzdanosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2 provest će se primjenom odgovarajućih (izmijenjenih) procesa održavanja na sustavima koji su označeni kao kritični na temelju istraživanja eksploatacijske pouzdanosti, a definirani su upravo tijekom provedenog istraživanja na osnovu prikupljenih empirijskih podataka. Optimizacija pouzdanosti osigurat će zadržavanje pune operativne sposobnosti brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora odnosno razinu pouzdanosti od 0,85 tijekom 2000 sati rada motora odnosno do generalne revizije motora te ujedno produljiti vrijeme do generalne revizije motora ovisno o rezultatima novih istraživanja.

## 7 MODEL POGODNOSTI ODRŽAVANJA BRZOOKRETNOG RADIJALNOG BRODSKOG DIZELSKOG MOTORA

Kao što je u prethodnom poglavlju disertacije naglašeno, vrijeme je ključni čimbenik ili ključna kategorija pri ocjeni sposobnosti nekog tehničkog sustava, u predmetnom slučaju brzookretnog radijalnog brodskog dizelskog motora M 504 B2, u ispunjenju funkcije za koju je namijenjen, uključujući i kvarove i poteškoće koje se javljaju u popravku i održavanju motora. Analogno, prema relaciji (2.1), pod pogodnošću održavanja motora podrazumijeva se zapravo vjerojatnost da će motor, na kojem se pojavio kvar, biti vraćen u operativno stanje u predviđenom vremenu zastoja motora  $t_{zm}$ . Stoga je pogodnost održavanja motora M 504 B2 ujedno i projektirana sposobnost motora kao popravljivog sustava da zadrži (kroz preventivno održavanje) ili vrati (kroz korektivno održavanje) operativnu raspoloživost motora  $O_{rm}$ , koja je određena prije spomenutom relacijom (2.1). Potpuno je razvidno, da bi se vratila projektirana sposobnost nakon kvara, vrijeme trajanja korektivnog održavanja  $t_{kodr}$  mora biti manje ili jednako vremenu zastoja motora  $t_{zm}$ , tj. da vrijedi sljedeća relacija [6], [20], [31], [38]:

$$t_{kodr} \leq t_{zm} = t_{lm} + t_{am} + t_{avkm} \quad (7.1)$$

gdje je:

$t_{kodr}$  – vrijeme korektivnog održavanja [h],

$t_{lm}$  – logističko vrijeme motora [h],

$t_{am}$  – administrativno vrijeme motora [h],

$t_{avkm}$  – aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora [h].

Logističko vrijeme motora  $t_{lm}$  obuhvaća vrijeme nabave i kompletiranja pričuvnih dijelova, administrativno vrijeme motora  $t_{am}$  obuhvaća vrijeme u kojem odgovorne osobe za održavanje realiziraju administrativne aktivnosti nužne za uspješnu provedbu održavanja, a aktivno vrijeme održavanja motora  $t_{avkm}$  obuhvaća: vrijeme demontaže i pripreme  $t_{dmp}$ , vrijeme potrebno za defektaciju uočenog kvara  $t_{dk}$ , vrijeme otklanjanja kvara i montaže  $t_{okm}$  i vrijeme potrebno za funkcionalno ispitivanje motora nakon montaže  $t_{im}$ . Prema tome vrijedi sljedeća relacija:

$$t_{avkm} = t_{dmp} + t_{dk} + t_{okm} + t_{im} \quad (7.2)$$

gdje je:

$t_{avkm}$  – aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora [h],

$t_{dmp}$  – vrijeme demontaže i pripreme [h],

$t_{dk}$  – vrijeme potrebno za defektaciju uočenog kvara [h],

$t_{okm}$  – vrijeme otklanjanja kvara i montaže [h],

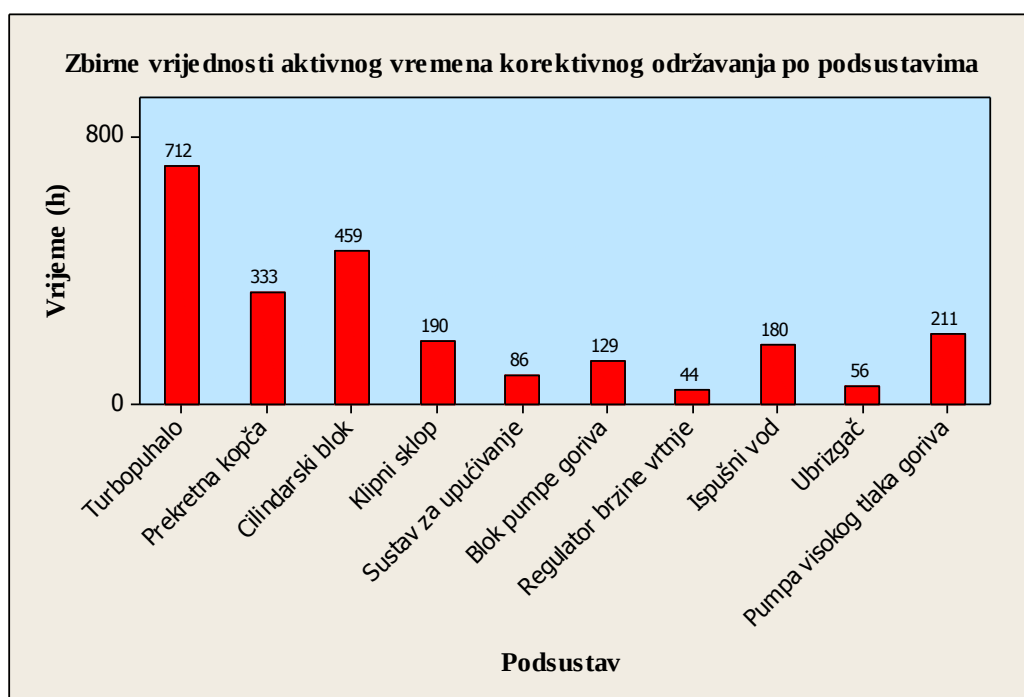
$t_{im}$  – vrijeme potrebno za funkcionalno ispitivanje motora nakon montaže [h].

Slijedom prije navedenog izrađena je tablica 7.1 u kojoj je prikazano srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  pojedinog podsustava motora M 504 B2

Tablica 7.1 Srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja pojedinog podsustava motora M 504 B2

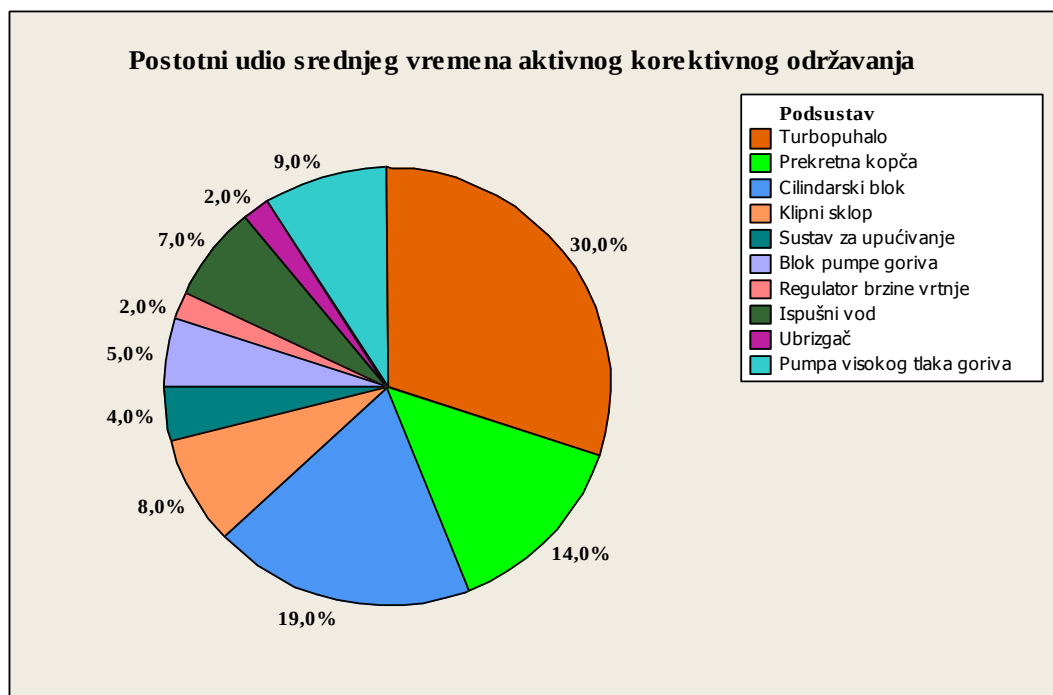
| Podsustav                 | Kvar                              | $t_{dmp}$ [h] | $t_{dk}$ [h] | $t_{okm}$ [h] | $t_{im}$ [h] | $t_{avkm}^{sr}$ [h] |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------------|
| Turbopuhalo               | Rotor                             | 60            | 8            | 80            | 32           | 180                 |
|                           | Regulacijski ventil               | 16            | 3            | 32            | 3            | 54                  |
|                           | Labirint                          | 80            | 5            | 120           | 3            | 208                 |
|                           | Usmjerivači plinova               | 40            | 24           | 56            | 24           | 144                 |
|                           | Brтва                             | 2             | 1            | 3             | 0            | 6                   |
|                           | Vijak za regulaciju               | 6             | 2            | 8             | 1            | 17                  |
|                           | Kućište                           | 32            | 5            | 40            | 26           | 103                 |
| Prekretna spojka          | Suport spojke                     | 48            | 16           | 56            | 16           | 136                 |
|                           | Kućište spojke                    | 80            | 6            | 110           | 1            | 197                 |
| Cilindarski blok          | Curenje goriva                    | 8             | 3            | 16            | 1            | 28                  |
|                           | Propuštanje kompresije            | 56            | 8            | 80            | 1            | 145                 |
|                           | Emulzija u cilindru               | 56            | 8            | 80            | 8            | 152                 |
|                           | Propuštanje goriva bloka cilindra | 40            | 16           | 70            | 8            | 134                 |
| Klipni sklop              | Oštećenje klipa                   | 70            | 6            | 90            | 24           | 190                 |
| Sustav za upućivanje      | Lom uputnog ventila               | 16            | 2            | 20            | 3            | 41                  |
|                           | Blokiran uputni ventil            | 16            | 2            | 24            | 3            | 45                  |
| Blok-pumpa goriva         | Letva goriva                      | 48            | 8            | 68            | 5            | 129                 |
| Regulator brzine vrtnje   | Lom opruge regulatora             | 16            | 3            | 24            | 1            | 44                  |
| Ispušni vod               | Propuštanje emulzije              | 32            | 1            | 54            | 1            | 88                  |
|                           | Puknuće vijka                     | 40            | 1            | 50            | 1            | 92                  |
| Ubrizgač                  | Izgorio rasprskič                 | 9             | 3            | 12            | 3            | 27                  |
|                           | Procurio rasprskič                | 9             | 3            | 14            | 3            | 29                  |
| Visokotlačna pumpa goriva | Propuštanje goriva                | 32            | 5            | 40            | 2            | 79                  |
|                           | Blokiran mehanizam upravljanja    | 56            | 8            | 60            | 8            | 132                 |

Podaci o aktivnom vremenu korektivnog održavanja prikazani u tablici 7.1 prikupljeni su tijekom istraživanja pouzdanosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2 u suradnji s djelatnicima NCP Grupe iz Šibenika (NCP – Remontno brodogradilište „Šibenik“ d.o.o. – remont, održavanje, preinake, novogradnja jahti i brodova do 75 m / 1.500 t), koji su direktno uključeni u organizaciji, nadzoru i u provedbi svih radova održavanja motora M 504 B2 [52]. Svi podsustavi navedeni u tablici 7.1 suglasni su s tablicom 3.1, gdje su prikazana vremena pojave kvara na podsustavima dizelskog motora M 504 B2. Na temelju tablice 4.1 izrađen je dijagram zbirnih vrijednosti srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}_i$ ,  $i=1,2...10$  po pojedinim podsustavima motora M 504 B2, kako je prikazano na slici 7.1.



Slika 7.1 Zbirne vrijednosti srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja motora po podsustavima

Na temelju slike 7.1 izrađen je dijagram postotnog udjela vremena  $t_{avkm}^{sr}_i$ , prikazan na slici 7.2.

Slika 7.2 Postotni udio vremena  $t_{avkm}^{sr}$  po podsustavima

Prema slici 7.2 uočava se da je 63 % srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  bilo usmjereno na tri podsustava: turbopuhalo (30 %), cilindarski blok (19 %) i prekretnu spojku (14 %). Dakle, ukupno srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  svih 69 kvarova na šest motora prema tablici 4.1 iznosi 2400 radnih sati, dok na tri prije spomenuta podsustava otpada 1512 radnih sati.

U svrhu usporedbe u nastavku su prikazana vremena radova preventivnog održavanja dizelskog motora M 504 B2 koje je definirao proizvođač motora [50]:

- demontaža motora iz broda – 130 radnih sati,
- generalna revizija motora – 7494 radna sata,
- servis motora – 1260 radnih sati,
- revizija spojke – 748 radnih sati,
- servis turbopuhala – 340 radnih sati,
- ispitivanje na probnom stolu – 550 radnih sati,
- montaža na brod – 240 radnih sati.

Isto kao i u analizi pouzdanosti, najbolji način za analizu pogodnosti održavanja brodskog dizelskog motora M 504 B2 je određivanje funkcije pogodnosti održavanja  $M(t)$ .

**7.1 Analiza pogodnosti održavanja brodskog dizelskog motora M 504 B2**

Ključna razlika između analize pouzdanosti motora i analize pogodnosti održavanja motora leži u činjenici da je pouzdanost zapravo vjerojatnost da se kvar motora neće dogoditi u nekom određenom (specificiranom) vremenu koje u slučaju dizelskog motora M 504 B2 iznosi 2000 sati. Pogodnost održavanja zapravo je vjerojatnost da se motor može vratiti u ispravno stanje u nekom određenom (specificiranom) vremenu, koje je u konkretnom slučaju vrijeme zastoja motora  $t_{zm}$ . U tom slučaju vrijeme zastoja motora ne bi smjelo biti veće od  $2000 - 890 = 1110$  sati, pod uvjetom da je operativna raspoloživost od 44 % zadovoljavajuća.

Slijedom prije navedenog može se reći da se pogodnost održavanja motora zasniva na vremenu zastoja motora  $t_{zm}$ , a analogno tome popravljivost motora ograničava se samo na aktivno vrijeme održavanja motora (ili aktivno vrijeme popravka motora). U tom kontekstu razlikujemo aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $t_{avkm}$  i aktivno vrijeme preventivnog održavanja  $t_{avpm}$ . Pod pretpostavkom da je vrijeme održavanja sustava  $t$  slučajna varijabla nezavisna o vremenu rada motora  $t'$ , tada je funkcija  $M(t)$  određena izrazom (4.3) [31]:

$$M(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (7.3)$$

$M(t)$  je funkcija pogodnosti održavanja, a funkcija  $f(t)$  je funkcija gustoće vjerojatnosti za ukupno vrijeme zastoja motora  $t_{zm}$ . Analogno prije navedenome, funkcija  $M_R(t)$  određena je izrazom (4.4) [31]:

$$M_R(t) = \int_0^t f_R(t)dt \quad (7.4)$$

$M_R(t)$  je funkcija popravljivosti motora, a funkcija  $f_R(t)$  je funkcija gustoće vjerojatnosti za aktivno vrijeme popravka.

Budući da je u prethodnom poglavlju utvrđeno kako funkcija intenziteta kvara  $\lambda_i$  pojedinog podsustava iz tablice 7.1 nije konstantna, tada su funkcije gustoće vjerojatnosti  $f(t)$  koje se uzimaju u obzir u analizi pogodnosti održavanja brodskog dizelskog motora M 504 B2 sljedeće: normalna distribucija, logonormalna distribucija i Weibullova distribucija.

Normalna distribucija

Funkcija pogodnosti održavanja  $M(t)$  određena je sljedećim izrazom [6]:

$$M(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-M}{\sigma}\right)^2} dt \quad (7.5)$$

gdje je:

$t$  – slučajna varijabla vremena održavanja,

$M$  – srednja vrijednost vremena održavanja,

$\sigma$  – standardna devijacija vremena održavanja.

#### Logonormalna distribucija

Funkcija pogodnosti održavanja određena je izrazom [6]:

$$M(t) = \int_0^t \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m}{\sigma}\right)^2} dt \quad (7.6)$$

gdje je:

$t$  – slučajna varijabla vremena održavanja,

$m$  – srednja vrijednost prirodnog logaritma vremena održavanja,

$\sigma$  – standardna devijacija rasipanja prirodnog logaritma vremena održavanja.

#### Weibullova distribucija

U slučaju Weibullove distribucije funkcija pogodnosti održavanja definirana je relacijom [6]:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (7.7)$$

gdje je:

$t$  – slučajna varijabla vremena održavanja,

$\beta$  – parametar oblika,

$\eta$  – parametar razmjere.

Polazeći od prije navedenih oblika funkcija pogodnosti odražavanja  $M(t)$ , odredit će se empirijska funkcija pogodnosti održavanja odnosno funkcija popravljivosti motora  $M_R(t)$  na temelju podataka iz tablice 7.1 i relacije za parametarsku procjenu funkcije popravljivosti koja je određena sljedećom relacijom [3], [6]:

$$M_R(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N+1} \quad (4.8)$$

gdje je:

$n_j$  – broj slučaja kada je vrijeme završetka postupaka održavanja  $t_j$ ,

$N$  – ukupan broj postupaka održavanja, tj. zbroj svih  $n_j$ .

Za proračun prema relaciji (7.8), empirijske vrijednosti  $t_j$  moraju biti poredane u rastućem nizu od najmanjeg  $t_1$  do najvećeg vremena  $t_n$ .

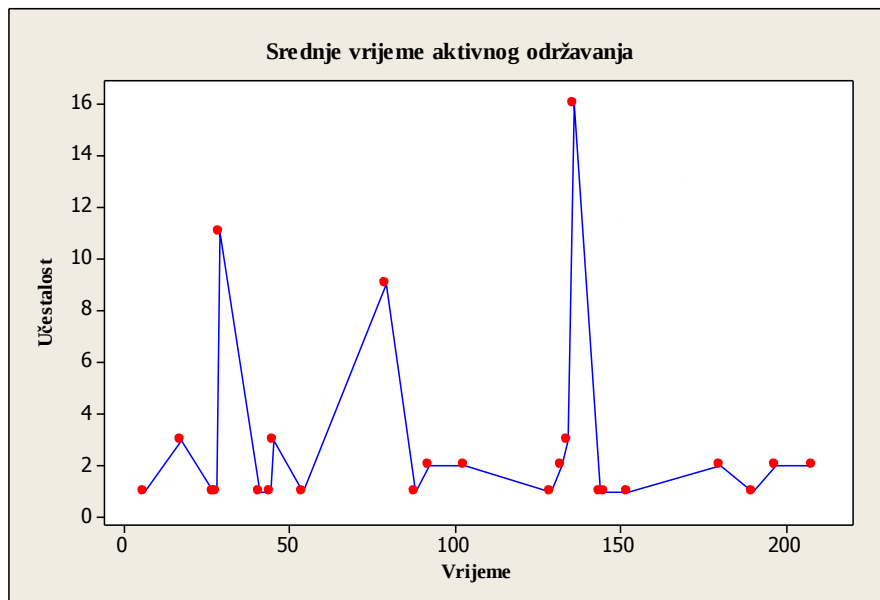
**7.2 Određivanje empirijske vrijednosti funkcije popravljivosti motora M 504 B2**

Na temelju podataka danih u tablici 4.1 i 7.1 izrađena je tablica 7.2 u kojoj su prikazani: srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja elemenata podsustava motora  $t_{avkm}^{sr_j}$  u rastućem slijedu, gdje je  $j=1, 2... 24$ , i učestalost provođenja popravka po pojedinom elementu podsustava  $f_j$ , koja proizlazi iz učestalosti pojavljivanja kvara (tablica 3.1).

Tablica 7.2 Srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora  $t_{avkm}^{sr_j}$

| Elementi motora                      | Srednje vrijeme<br>$t_{avkm}^{sr_j}$ [h] | Učestalost<br>popravka $f_j$ |
|--------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| Brtva                                | 6                                        | 1                            |
| Vijak za regulaciju                  | 17                                       | 3                            |
| Izgorio rasprskач                    | 27                                       | 1                            |
| Curenje goriva                       | 28                                       | 1                            |
| Procurio rasprskач                   | 29                                       | 11                           |
| Lom uputnog ventila                  | 41                                       | 1                            |
| Lom opruge regulatora                | 44                                       | 1                            |
| Blokiran uputni ventil               | 45                                       | 3                            |
| Regulacijski ventil                  | 54                                       | 1                            |
| Propuštanje goriva                   | 79                                       | 9                            |
| Propuštanje emulzije                 | 88                                       | 1                            |
| Puknuće vijka                        | 92                                       | 2                            |
| Kućište                              | 103                                      | 2                            |
| Letva goriva                         | 129                                      | 1                            |
| Blokiran mehanizam<br>upravljanja    | 132                                      | 2                            |
| Propuštanje goriva bloka<br>cilindra | 134                                      | 3                            |
| Suport spojke                        | 136                                      | 16                           |
| Usmjerivači plinova                  | 144                                      | 1                            |
| Propuštanje kompresije               | 145                                      | 1                            |
| Emulzija u cilindru                  | 152                                      | 1                            |
| Rotor                                | 180                                      | 2                            |
| Oštećenje klipa                      | 190                                      | 1                            |
| Kućište spojke                       | 197                                      | 2                            |
| Labirint                             | 208                                      | 2                            |

Na slici 7.3 prikazan je dijagram učestalosti srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  po pojedinom elementu podsustava, a koja je izrađena na temelju tablice 7.2.



Slika 7.3 Učestalost srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  po pojedinom elementu podsustava

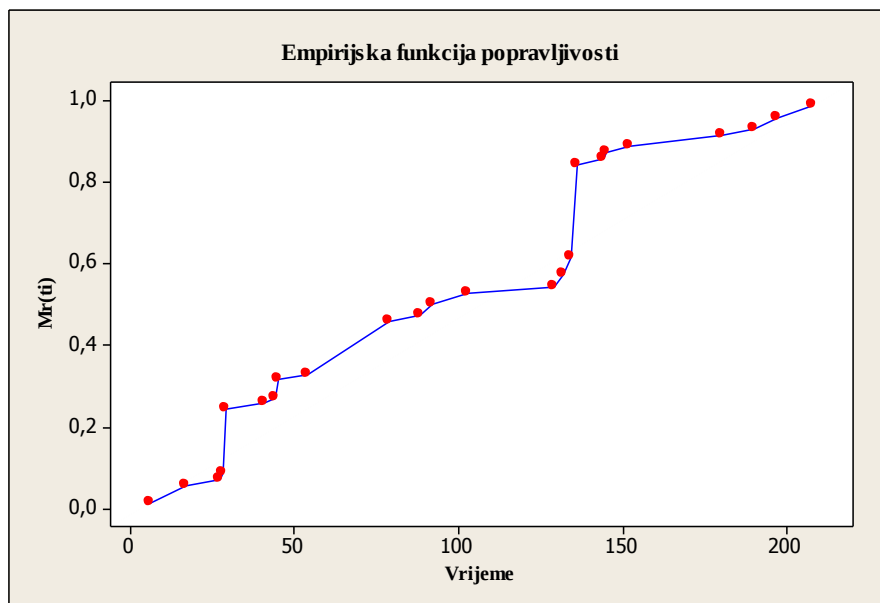
Prema slici 4.3 posebno se ističu tri aktivna vremena  $t_{avkm}$  s najvećom učestalošću: 29 sati (11 puta), 79 sati (9 puta) i 136 sati (16 puta), dok se učestalost ostalih aktivnih vremena kreće između jedan i tri puta. Iz tablice 7.2, a prema relaciji:

$$MTTP = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^{24} f_j \cdot t_{avkmj}^{sr} \quad (7.9)$$

može se izračunati srednje vrijeme popravka motora (MTTP) koje iznosi 1111 radnih sati, a „jednako“ je vremenu zastoja motora  $t_{zm}$  koje iznosi 1110 sati. Na temelju tablica 7.1, 7.2 i slike 7.3 može se zaključiti da se srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja  $t_{avkm}^{sr}$  razlikuje od slučaja do slučaja i ovisno je o vrsti kvara koji je uzrokovao zastoj motora. Naime, vrijeme  $t_{avkm}^{sr}$  nije konstantno, već se statistički mijenja i predstavlja slučajnu varijablu. Zato je potrebno odrediti empirijsku funkciju popravljivosti podsustava motora  $M_R(t_i)$  na temelju prikupljenih empirijskih podataka iz tablice 7.2. Proračunati podaci prikazani su u tablici 7.3 i na slici 7.4.

Tablica 7.3 Empirijska funkcija popravljivosti podsustava motora

| Elementi motora                      | Srednje vrijeme<br>$t_{avkm}^{sr} [h]$ | Učestalost<br>popravka $f_j$ | $M_R(t_i)$ |
|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|------------|
| Brtva                                | 6                                      | 1                            | 0,0142857  |
| Vijak za regulaciju                  | 17                                     | 3                            | 0,0571429  |
| Izgorio rasprskič                    | 27                                     | 1                            | 0,0714286  |
| Curenje goriva                       | 28                                     | 1                            | 0,0857143  |
| Procurio rasprskič                   | 29                                     | 11                           | 0,2428571  |
| Lom uputnog ventila                  | 41                                     | 1                            | 0,2571429  |
| Lom opruge regulatora                | 44                                     | 1                            | 0,2714286  |
| Blokiran uputni ventil               | 45                                     | 3                            | 0,3142857  |
| Regulacijski ventil                  | 54                                     | 1                            | 0,3285714  |
| Propuštanje goriva                   | 79                                     | 9                            | 0,4571429  |
| Propuštanje emulzije                 | 88                                     | 1                            | 0,4714286  |
| Puknuće vijka                        | 92                                     | 2                            | 0,5        |
| Kućište                              | 103                                    | 2                            | 0,5285714  |
| Letva goriva                         | 129                                    | 1                            | 0,5428571  |
| Blokiran mehanizam<br>upravljanja    | 132                                    | 2                            | 0,5714286  |
| Propuštanje goriva bloka<br>cilindra | 134                                    | 3                            | 0,6142857  |
| Suport spojke                        | 136                                    | 16                           | 0,8428571  |
| Usmjerivači plinova                  | 144                                    | 1                            | 0,8571429  |
| Propuštanje kompresije               | 145                                    | 1                            | 0,8714286  |
| Emulzija u cilindru                  | 152                                    | 1                            | 0,8857143  |
| Rotor                                | 180                                    | 2                            | 0,9142857  |
| Oštećenje klipa                      | 190                                    | 1                            | 0,9285714  |
| Kućište spojke                       | 197                                    | 2                            | 0,9571429  |
| Labirint                             | 208                                    | 2                            | 0,9857143  |



Slika 7.4 Empirijska funkcija popravljivosti podsustava motora

Oblik empirijske funkcije popravljivosti podsustava motora prikazan na slici 4.4 ukazuje koja funkcija na najbolji način opisuje empirijske podatke. U konkretnom slučaju pretpostavka je da je to normalna distribucija.

Na temelju dobivenih rezultata istraživanja prikazanih na slici 7.4 odnosno oblika empirijskih funkcija popravljivosti podsustava brzookretnog dizelskog motora M 504 B2, može se postaviti sljedeća hipoteza:

- Normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju popravljivosti radijalnog brzookretnog brodskog dizelskog motora.
- Srednja vrijednost vremena održavanja  $M$  odgovara srednjem vremenu popravka radijalnog brzookretnog brodskog dizelskog motora po podsustavima ( $MTTR_{ps}$ ).

Testiranje postavljene hipoteze provedeno je uz pomoć programskog paketa Minitab 16 i Anderson-Darling testa.

### 7.3 Aproksimacija normalnom distribucijom

Sukladno relaciji (7.5) funkcija popravljivosti  $M_R(t)$  ima sljedeći oblik:

$$M_R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-M}{\sigma}\right)^2} dt \quad (7.10)$$

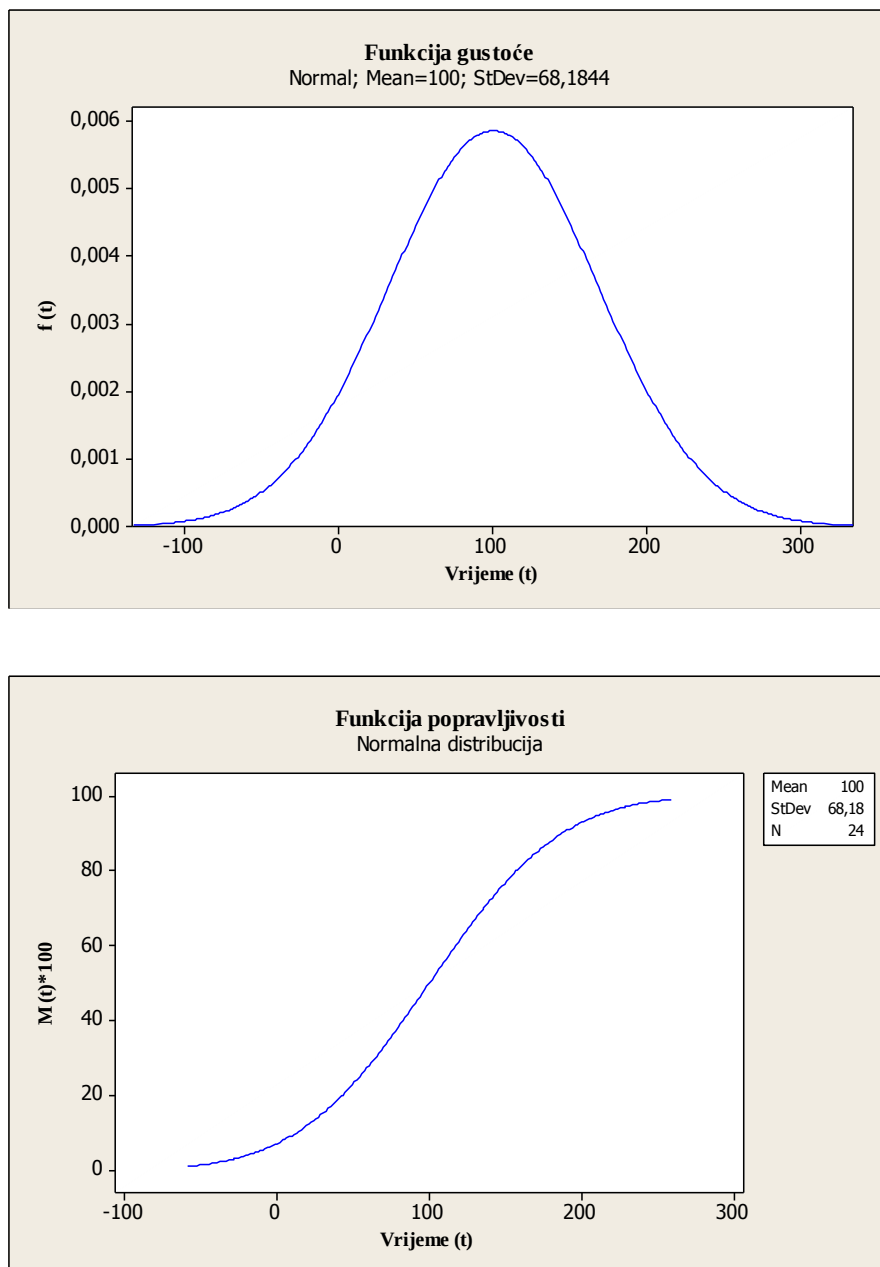
gdje je:

$t$  – slučajna varijabla vremena popravljivosti,

$M = MTTP^{12}$  – srednje vrijeme popravljivosti motora po podsustavima,

$\sigma$  – standardna devijacija vremena popravljivosti motora po podsustavima.

Na slici 7.5 prikazan je dijagram funkcije gustoće normalne distribucije i funkcije popravljivosti normalne distribucije.



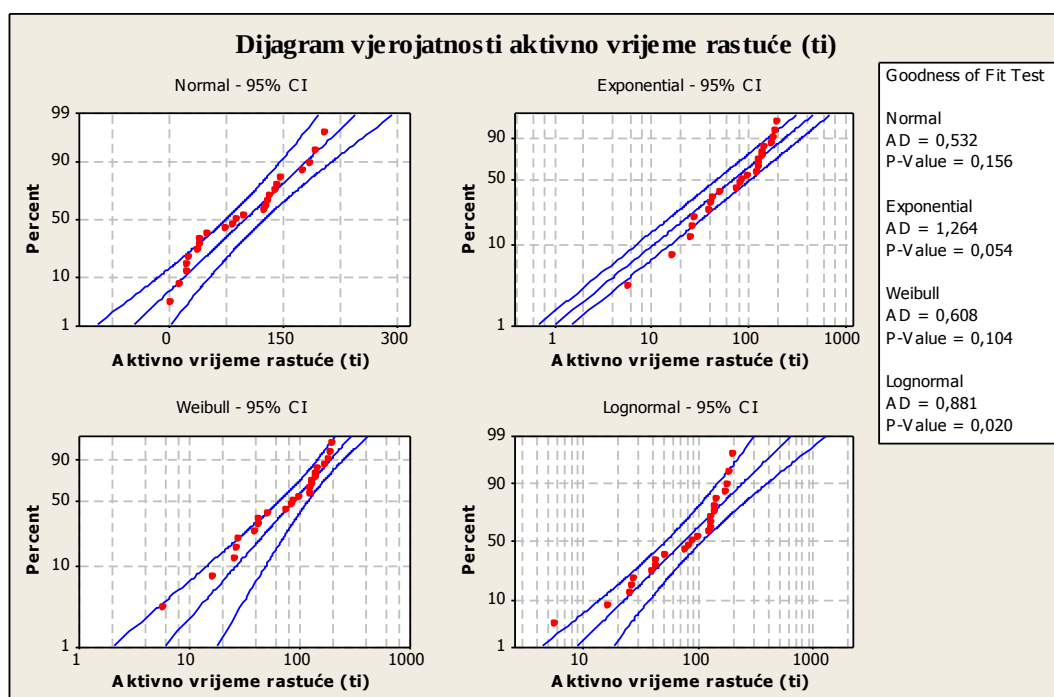
Slika 7.5 Funkcije gustoće normalne distribucije i funkcije popravljivosti normalne distribucije

<sup>12</sup> Srednje vrijeme popravljivosti motora po podsustavima

Uzimajući sve prethodno u obzir, slijedi testiranje postavljenih hipoteza.

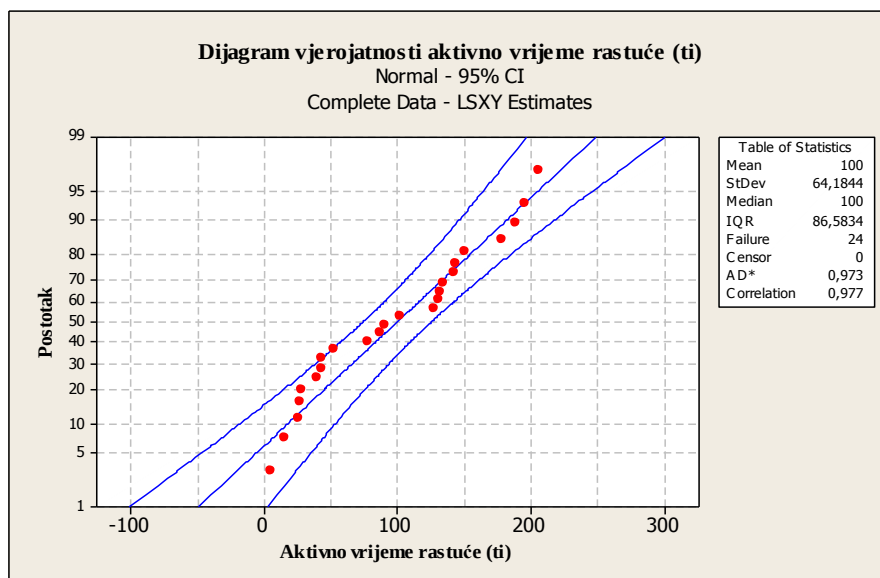
#### 7.4 Testiranje hipoteza

U ovoj će se točki testirati postavljena hipoteza da normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju popravljivosti motora po podsustavima, a provest će se uz pomoć programskog paketa Minitab 16. Ulazni podaci uzeti su iz tablice 4.3. Kriteriji na temelju kojih će se prihvatiti ili odbaciti postavljena hipoteza prethodno su navedeni, a to su najmanja vrijednost AD parametra i vrijednost  $p$  parametra veća od 0,05. Slijedom navedenog na slikama 7.6 i 7.7 prikazani su rezultati testiranja.



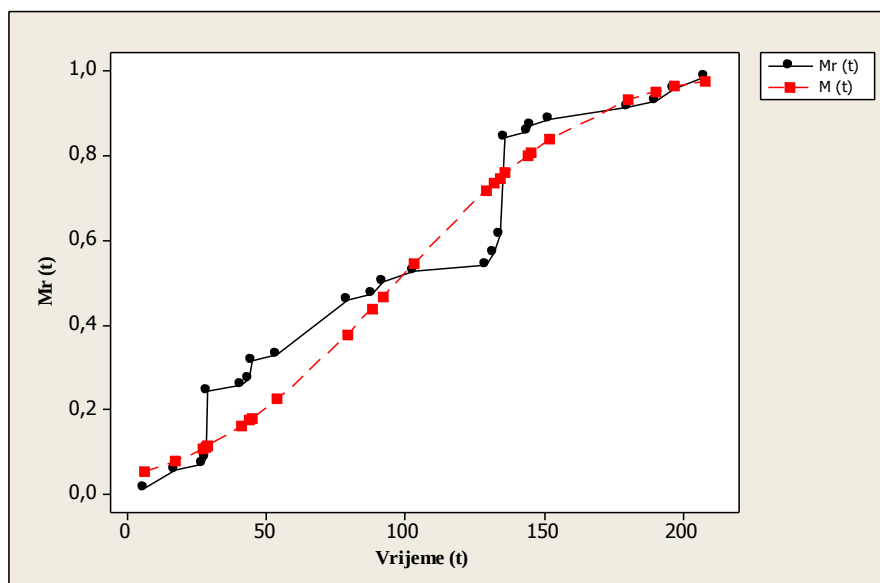
Slika 7.6 Usporedni test statističkih distribucija (normalna, eksponencijalna, Weibulova i logonormalna)

Rezultati testiranja prikazani na slici 7.6 pokazuju da normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju popravljivosti  $M_R(t)$ , jer je jedino tada parametar AD najmanji i iznosi 0,532, a parametar  $p > 0,05$  i iznosi 0,156. Na slici 7.7 prikazani su glavni parametri normalne distribucije, i to  $M=100$  sati i  $\sigma=64,1844$  sata.



Slika 7.7 Parametri normalne distribucije

Slijedom prije navedenog prihvaćena je postavljena hipoteza da normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju popravljivosti, a srednja vrijednost vremena održavanja  $M$  odgovara srednjem vremenu popravka motora po podsustavima ( $MTTR_{ps}$ ). Budući da motor ima 10 podsustava, tada je srednje vrijeme popravka motora iznosilo  $MTTR=1000$  sati. Poradi usporedbe na slici 7.8 prikazana je empirijska funkcija i aproksimirana funkcija popravljivosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2.

Slika 7.8 Empirijska funkcija i aproksimirana funkcija popravljivosti brzookretnog radijalnog  
dizelskog motora M 504 B2

Slijedi zaključak doktorske disertacije.



## **8 ZAKLJUČAK**

Unatoč novim saznanjima o eksploatacijskoj pouzdanosti brodskih dizelskih motora, još uvijek postoji značajan prostor za daljnja znanstvena istraživanja u smjeru povećanja izdržljivosti i eksploatacijske pouzdanosti brodskih dizelskih motora, kako u slučaju kvarova uzrokovanih svojstvima materijala, načinom i uvjetima uporabe tako i u slučaju odabrane tehnologije održavanja dizelskih motora. To se posebno odnosi na brzookretne radijalne brodske dizelske motore, koji su najmanje zastupljeni u dosadašnjim istraživanjima, a koji su najviše zastupljeni na brzim brodovima Hrvatske ratne mornarice.

U radu je opisan predmet istraživanja i problemi koji se pojavljuju u praksi, pa se kao logički cilj istraživanja nametnuo zadatak istražiti zakonitosti pojave kvarova na glavnom motoru raketnih topovnjača i predložiti metode za smanjenje njihove pojave, a time i povećanje pouzdanosti Flote HRM-a u cijelosti, što je vrlo važno za moguća borbena djelovanja. Jedan od ciljeva istraživanja bilo je i smanjenje zalihosti pričuvnih dijelova koji leže na skladištu, ne koriste se te rezultiraju nepotrebnim troškovima nabave i skladištenja.

Za definiranje ukupne pouzdanosti raketne topovnjače trebalo je analizirati sve sustave, napraviti raščlambu na podsustave te odrediti i definirati najbolji model pouzdanosti raketne topovnjače, a to je u radu i učinjeno. Kao glavni predmet istraživanja definiran je glavni motor, koji je temeljna karika u pouzdanosti pogonskog sustava RTOP-a, a time i ukupne pouzdanosti RTOP-a. Za određivanje pouzdanosti pogonskog sustava raketne topovnjače, a kako bi se pokazalo o koliko podsustava ovisi, bilo je potrebno definirati grafički model pouzdanosti broskog brzookretnog dizelskog motora.

Prikupljen je veliki broj podataka o pojavi i vrstama kvarova na ukupno šest motora RTOP-a, koji su sistematizirani po predloženom modelu. Podaci su statistički obrađeni, definirane su empirijske funkcije gustoće kvarova, učinjene su aproksimacije Weibullovom distribucijom, a vjerodostojnost je potvrđena programskim paketom Minitab 16 čime je izvršena aproksimacija i testiranje po podsustavima.

Za određivanje modela eksploatacijske pouzdanosti motora bilo je potrebno definirati numerički model i optimizirati eksploatacijsku pouzdanost.

Za model pogodnosti održavanja glavnog broskog brzookretnog radijalnog dizelskog motora napravljena je analiza pogodnosti održavanja broskog dizelskog motora tipa „Zvezda“ M 504 B2, odredila se empirijska vrijednost funkcije popravljivosti tog istog motora, izvršila se aproksimacija normalnom distribucijom te je ona i validirana.

Na temelju rezultata istraživanja utvrđeno je da su dizelski motori tipa „Zvezda“ M 504 B2 u periodu od 500 radnih sati najviše korišteni u osnovnom režimu rada (prazni hod i manevar) cca 45 % od ukupnog vremena korištenja. Istovremeno su u režimima od  $1500 \text{ min}^{-1}$  i više radili svega 15 % od promatranog vremena. Ovakav neprikladan način korištenja motora, suprotan preporukama proizvođača, uzrokovao je kvarove i eksploatacijsku nepouzdanost brodskih motora. Kako se uistinu radilo o pojavi koja nije u skladu s preporukama proizvođača, a operativni uvjeti uporabe i mogućnosti HRM-a zahtijevali su upravo takvo korištenje motora u realnim uvjetima, potrebno je bilo znanstveno istražiti ovu pojavu i u takvim okolnostima odrediti eksploatacijsku pouzdanost i pogodnost održavanja glavnog motora.

Temeljem istraživanja, hipoteze postavljene na početku rada su dokazane i prihvaćene, odnosno:

$H_0^1$ : Weibullova distribucija najbolje aproksimira karakteristiku eksploatacijske pouzdanosti radijalnog brzookretnog brodskog dizelskog motora.

$H_0^2$ : Očekivano vrijeme rada bez kvara  $E(T)$  radijalnog brzookretnog brodskog dizelskog motora može se dobro aproksimirati srednjim vremenom između kvara (MTBF), tj. vrijedi da je  $E(T) = \text{MTBF}$ , ako se funkcija gustoće kvara ravna prema Weibullovoj distribuciji.

$H_1^1$ : Normalna distribucija najbolje aproksimira empirijsku funkciju pogodnosti održavanja odnosno popravljivosti radijalnog brzookretnog brodskog dizelskog motora.

$H_1^2$ : Srednja vrijednost vremena održavanja  $M$  odgovara srednjem vremenu popravka motora po podsustavima ( $\text{MTTR}_{ps}$ ).

Treba ponoviti da se funkcija pouzdanosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora ravna prema Weibullovoj distribuciji, ali se svi podsustavi ne ravnaju prema Weibullovoj distribuciji, već je primjenljiva i normalna distribucija (turbopuhalo, ubrizgač i visokotlačna pumpa goriva).

Važno je zaključiti:

- a) Kada se pojavljivanje kvarova ravna prema Weibullovoj distribuciji, znači da se kvarovi ne pojavljuju slučajno, kao što bi bio slučaj u eksponencijalnoj distribuciji, a uzroci kvara motora mogu biti preopterećenja motora, zamor materijala, značajno habanje dijelova motora, korozija i (ili) ljudski čimbenik.
- b) Kada se pojavljivanje kvarova ravna prema normalnoj distribuciji, uzrok je starenje sustava tijekom uporabe, tj. javlja se povećana istrošenost dijelova podsustava.
- c) Utvrđena sposobnost vraćanja dizelskog motora u operativno stanje pomoću korektivnog održavanja zahtjeva visoku razinu održavanja, tj. specijalizirano osoblje i remontne kapacitete za obavljanje najsloženijih radnji održavanja, i značajno ovisi o nabavi pričuvnih dijelova i opreme.
- d) Operativna raspoloživost od 44 % je nedovoljna, a srednje vrijeme popravka od minimalno 1000 sati po motoru preveliko, kao i srednje vrijeme popravka podsustava motora od 100 sati.
- e) Preventivno održavanje kojim se sprječava nastanak kvara uslijed starenja i habanja ne daje odgovarajuće rezultate, pa su kvarovi uzrokovani u najvećem broju ljudskim čimbenikom i nepovoljnim uvjetima eksploatacije glavnih motora raketnih topovnjača, koji su u neskladu s preporukama proizvođača.

Općeniti je zaključak da je potrebna promjena koncepta uporabe i odražavanja brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora tipa „Zvezda“ M 504 B2.

Znanstveni doprinos ove disertacije očituje se:

- a) u definiranju modela pouzdanosti raketne topovnjače od kojeg je u radu detaljno obrađen samo pogonski sustav, dok ostali sustavi mogu biti predmetom daljnjih istraživanja;
- b) u analizi i sintezi statistički prikupljenih empirijskih podataka na temelju kojih su određeni parametri funkcije pouzdanosti, funkcije intenziteta kvara i funkcije popravljivosti dizelskog motora tipa „Zvezda“ M 504 B2, ugrađenih na raketne topovnjače, a u odnosu na režime njihove plovidbe;
- c) u određivanju modela eksploatacijske pouzdanosti i pogodnosti održavanja (popravljivosti) brzookretnih radijalnih brodskih dizelskih motora na temelju empirijskih podataka;
- d) u optimizaciji eksploatacijskog modela i poopćenju rezultata istraživanja, pa se predloženi model može primijeniti i na druge slične brodske motore, ali i na dizelske motore drugih namjena, primjerice na lokomotive i sl.;

- e) u znanstvenom tumačenju i primjeni rezultata istraživanja, na način da se povezuju teorijske postavke iz znanstvene literature i neposredna praktična primjena u cilju povećanja operativne raspoloživosti brodskog dizelskog motora, a time i pogonskog sustava raketne topovnjače u njegovom životnom vijeku.

Potvrđena je i praktična primjenljivost rezultata istraživanja, a koja se očituje:

- a) u predviđanju kvarova vitalnih podsustava i dijelova brzookretnog radijalnog dizelskog motora, boljem alociranju potrebnih remontnih kapaciteta i financijskih sredstava kao i nabave pričuvnih dijelova i elemenata, što će posljedično dovesti do veće učinkovitosti i ušteda proračunskih financijskih sredstava;
- b) u sagledavanju učinkovitosti pojedinih komponenti propulzijskog sustava u odnosu na operativne zahtjeve uporabe ratnog broda te troškova održavanja složenih komponenti tijekom životnog ciklusa.

Svi rezultati istraživanja i saznanja do kojih se došlo u ovoj disertaciji koristit će menadžmentu zaduženom za održavanje ratnih brodova te sustavu za upravljanje zalihama pričuvnih dijelova. Rezultati bi jednako tako trebali pomoći u obuci posade i djelatnika neposredno uključenih u proces eksploatacije i održavanja ratnih brodova Hrvatske ratne mornarice.

Svakako treba naglasiti da rezultate istraživanja ove doktorske disertacije treba primijeniti na Flotu HRM-a, naglasiti važnost što kvalitetnijeg budućeg vođenja evidencije o kvarovima i zastojima, a sve u cilju buduće validacije predloženog modela kao i eventualne njegove korekcije.

## POPIS LITERATURE I DRUGIH IZVORA

### (i) Knjige

- [1] Barle, J.: „Autorizirana predavanja“ (knjiga u izradi), Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2008.
- [2] Belak, S.: „Terotehnologija“, Šibenik, 2005.
- [3] Ivanović, G.; Stanivuković, D.: „Pouzdanost tehničkih sistema“, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 1983.
- [4] Lovrić, J.: „Osnove brodske terotehnologije“, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1989.
- [5] Tomić, M.; Adamović, Ž.: „Pouzdanost u funkciji održavanja tehničkih sistema“, Tehnička knjiga Beograd, 1986.
- [6] Vujanović, N.: „Teorija pouzdanosti tehničkih sistema“, Vojno izdavački i novinski centar, Beograd, 1990.

### (ii) Radovi objavljeni u znanstvenim časopisima i zbornicima

- [7] Avdić, H.; Hasanović, M.: „Uticaj upravljanja sistemom održavanja na operativnu raspoloživost tehničkih sistema“, 2. Konferencija održavanje, 13. Juni 2012, Zenica
- [8] Banks, J.; Hines, J.; Lebold, M.; Campbell, R.; Begg, C.; Byington, C.: „Failure Modes and Predictive Diagnostics Considerations for Diesel Engines“, 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia, April 2 - 5, 2001.
- [9] Barringer, H. P.: „Availability, Reliability, Maintainability, and Capability“ February 18, 1997; Beaumont, Texas
- [10] Bejger, A.; Bereczynski, S.: „A probabilistic analysis of failure occurrence in diesel engine injection system components“, Mechanical Technology and Automation, vol 32. no. 2. 2012
- [11] Bilić, B.; Jurjević, M.; Barle, J.: „Procjena pouzdanosti tehničkog sustava primjenom Markovljevih modela i sustavne dinamike“, *Strojarstvo*, 52, 2010, str. 271-281
- [12] Biočanin, Lj. Stojko; Pavlović, R. Milan: „Određivanje optimalne periodičnosti preventivnog održavanja motora V46-6 VTG“, Vol. LIX, No. 3., 2011, Beograd
- [13] Bukša, A.; Šegulja, I.: „Pouzdanost brodskih sustava“, *Pomorstvo*, god. 22, br. 2., 2008, str. 259-270
- [14] Bukša, A.; Martinović, D.; Vidaković, M.: „Analiza kvarova dizelskog motora brodskog porivnog sustava“, *Pomorstvo*, god. 23, br. 2., 2009, str. 391-404

- [15] Bukša, A.; Šegulja, I.; Tomas, V.: „Adjustment of Maintenance Approach for Improved Operability and Safety of Ship Navigation“, *Promet*, Vol. 22, No. 2., 2010, str. 95-103
- [16] Brkić, Lj.: 1.1, „Model otkrivanja i analize najmanje pouzdanih delova vozila“, VTG 6/99, 1999, Beograd
- [17] Dong, C.; Yuan, C.; Liu, Z.; Yan, X.: „Marine Propulsion System Reliability Research Based on Fault Tree Analysis“, Vol. 2., Iss. 1., Mar. 2013, pp. 33
- [18] Engman, S.; Cousine, A.: „Comparing distributions: The two sample Anderson-Darling test an alternative t the Kolmogorov-Smirnoff test“, *JAQM*, Vol. 6, No.3., 2011
- [19] Ćatić, D.: „Određivanje pouzdanosti glavnog cilindra sistema za kočenje motornih vozila“, *Tehnička dijagnostika*, vol. 8, br. 2, 2009, Beograd, str. 17-24
- [20] Đurović, D.: „Održavanje i efektivnosti sistema“, 2. Konferencija održavanje 2012, 13 Juni 2012, Zenica
- [21] Hashimoto, T.; Ishizuka, K.: „The Statistics of Failure and Evaluation of Reliability on the Marine Diesel Engine“, *M.E.S.* vol. 8, no 2. Feb 1973, Japan
- [22] Hernqvist, M.: „Main engine damage“, 22 CIMAC Congress, 18-21 May 1998, Copenhagen
- [23] Jorge Luis, R.: „A-D Test“, *RAC START*, Vol. 10, No.5., 2003
- [24] Klarin, M.; Misita, M.; Spasojević-Brkić, V.: „Savremene tendencije u upravljanju održavanjem - pristup održavanju zasnovan na riziku“, *Tehnička dijagnostika*, br. 3, 2008, str. 17-22
- [25] Kiriya, N.: „Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System“, *JIME*, (29), Aug. 22, 2000, pp 115-122
- [26] Kiriya, N.: „Reliability Estimation for Failures on Main Engine System by Ship Reliability Database System“, *Bulletin of the JIME*, Vol. 29, No.2., october 2001
- [27] Kolowrocki, K.: „Reliability and risk analysis of multi state systems with degrading components“, *R&RATA*, (Vol. 2), March 2009
- [28] Kubo, A.; Okawara, K.; Iwaya, K.; Igari, K.; Ohno, N.: „Analysis of Reliability/Failure of Newly Built Diesel Engines“, International council on combustion engines, Kyoto 2004.

- [29] Kunar, S.; Ghosh, G.; Mandal, K.; Bose, D.; Sau, S. P.: „Measurement and Evaluation of Reliability, Availability and Maintainability of a Diesel Locomotive Engine“, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Volume 8, Issue 1, Jul. - Aug. 2013, pp 31-46
- [30] Kurilj, K.: „Eksploatacijska pouzdanost građevinskih mašina“, *Tehnička dijagnostika*, vol. 1, br. 3, 2002, str. 34-42
- [31] Majdančić, N.: „Strategije održavanja i informacijski sustavi održavanja“, Slavonski Brod, 1999.
- [32] Malakhoff, A.; Klinkhamer, D.; McKesson, C. B.: „Analysis of the Impact of Reliability, Availability and Maintainability on Ship Survivability“, Conference on High Speed Ferries, Oslo, September 1998.
- [33] Matika, D.; Mihanović, L.: „Pouzdanost brzookretnog brodskog dizelskog motora lake konstrukcije“, *Brodogradnja*, br. 62., Zagreb, 2011.
- [34] Mihanović, L.: „Održavanja brodova hrvatske ratne mornarice, diplomski rad, Hrvatsko vojno učilište „Petar Zrinski“, lipanj 2013.
- [35] Milaković, J.; Bulatović, M.; Karadžić, R.: „Gotovost brodova u mornarici VCG“, 1. Konferencija održavanje 2010, Juni 2010, Zenica
- [36] Mišković, V.: „Izbor i analiza faktora koji utiču na sistem održavanja“, VTG 4-5/01, Beograd, 2001.
- [37] Pham, H.: „Reliability Modeling, Analysis and Optimization“, Rutgers University, 2006, USA
- [38] Prodanić, B.; Tomović, R.: „Model održavanja tehničkih sistema u ratnoj mornarici“, *Tehnička dijagnostika*
- [39] Raičković, D.: „Analiza vremena aktivne popravke kao dela ukupnog vremena popravke“, *Tehnička dijagnostika*, br. 3., 2010.
- [40] Rejec, E.: „Terotehnologija Suvremena organizacija održavanja sredstava“, *Informator*, Zagreb, 1974.
- [41] Shubinsky, I. B.; Schäbe, H.: „On the definition of functional reliability“, RT&A, (Vol.7), December 2012
- [42] Soszynska-Budny, J.: „Reliability, risk and availability anlysis of a container gantry crane“, RT&A, (Vol.1), March 2012
- [43] Smith, D.: „Reliability, Maintainability and Risk Practical methods for engineers“, Sixth Edition, 2001, Oxford

- [44] Šegulja, I.; Bukša, A.: „Održavanje broskog pogona“, *Pomorstvo*, god. 20., br. 2., 2006, str. 105-118
- [45] Šegulja, I.; Bukša, A.; Tomas, V.: „Maintenance Interval Adjustment of Significant Ship Propulsion Components“, *Promet*, Vol. 21, No. 3, 2009, str. 175-182
- [46] Tomas, V.; Šegulja, I.; Čišić, D.: „Mogućnosti i problemi primjene suvremenih strategija održavanja u pomorstvu“, *Pomorstvo*, god. 19., 2005, str. 29-41
- [47] Tomas, V.; Šegulja, I.: „Improvement of ship maintenance by applying the RCM method“, ICTS '97, 1997, Portorož
- [48] Ushakov, I.: „Reliability: past, present, future, Conference *Mathematical Methods in Reliability*“ 2000, Bordeaux, France
- [49] Vujanović, N.: „Neki aspekti predviđanja pogodnosti održavanja i popravljivosti sistema, s osvrtom na način izračunavanja pouzdanosti u slučaju preventivne zamjene“, VTG 1-2/93, 1993, Beograd
- [50] Zio, E.: „Reliability engineering: old problems and new challenges“, ESREL, 2007, Stavanger, Norway

**(iii) Priručnici, upute**

- [51] Dnevnik stroja brodova HRM
- [52] Evidencije tehnološkog procesa održavanja motora M 504 B2 ovlaštenog serviseru NCP Grupa, Šibenik
- [53] HRN EN 13306:2011. Naslov (HR): Održavanje - Nazivlje u održavanju, Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [54] Instrukcijske knjige za motor M 504 B2
- [55] Knjiga kvarova brodova HRM
- [56] Knjiga remontnih radova HRM
- [57] Naputak o održavanju TMS u OS RH
- [58] Pravilo uporabe raketne topovnjače DPM – 103, Split 2014.
- [59] Smart Ship project Assessment Report, 1998.
- [60] Tehnička dokumentacija o održavanju motora M 504 B2
- [61] Tehnička knjižica brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2

**(iv) Internetski izvori**

- [62] [www.minitab.com](http://www.minitab.com), preuzeto: 18. studenog 2014. godine
- [63] <http://www.statisticalengineering.com>, preuzeto 23. rujna 2014. godine

## **POPIS KRATICA**

|                    |                                                                                                       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AD                 | – Anderson-Darling test                                                                               |
| AIM                | – akustična induksijska na dnu ležeća mina                                                            |
| BOB                | – borbeno otpornost broda                                                                             |
| GMDSS              | – (engl. Global maritime distress and safety system) Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost |
| GPS                | – (engl. Global Positioning System) globalni navigacijski satelitski sustav                           |
| HRM                | – Hrvatska ratna mornarica                                                                            |
| K-S                | – Kolmogorov-Smirnovljev test                                                                         |
| MOL                | – mobilni obalni lanser (raketna bitnica)                                                             |
| MTTF               | – (engl. Mean Time To Failure) srednje vrijeme boravka sustava u stanju kvara                         |
| MTBF               | – (engl. Mean Time Between Failures) srednje vrijeme između kvara                                     |
| MTTR               | – (engl. Mean Time To Repair) srednje vrijeme do popravka kvara                                       |
| MTTR <sub>ps</sub> | – srednje vrijeme do popravka kvara po podsustavima                                                   |
| NATO               | – (engl. North Atlantic Treaty Organization) Organizacija Sjevernoatlantskog ugovora                  |
| NBK                | – nuklearno-biološko-kemijsko                                                                         |
| OMIN               | – obalno motrenje i navođenje                                                                         |
| RTOP               | – raketna topovnjača                                                                                  |
| SAAB               | – Saab Bofors Dynamics                                                                                |
| SAG                | – sidrena kontaktna galvanoelektrična mina                                                            |
| ZMIN               | – zračno motrenje i navođenje                                                                         |
| WMO                | – (engl. World Meteorological Organization) Svjetska meteorološka organizacija                        |

## **POPIS OZNAKA**

|             |                                              |
|-------------|----------------------------------------------|
| $A_{1111}$  | dobavna pumpa ulja                           |
| $A_{1112}$  | reduktor                                     |
| $A_{1113}$  | prekretna spojka                             |
| $A_{1114}$  | cjevovod goriva                              |
| $A_{1115}$  | cilindarski blok                             |
| $A_{1116}$  | klipna grupa                                 |
| $A_{1117}$  | sklop-klipnjača                              |
| $A_{1118}$  | koljenasta osovina                           |
| $A_{1119}$  | blok-pumpa goriva                            |
| $A_{11110}$ | razvodni mehanizam                           |
| $A_{11111}$ | sustav za upravljanje blok-pumpama goriva    |
| $A_{11112}$ | odušna cijev                                 |
| $A_{11113}$ | regulator brzine vrtnje s pogonom            |
| $A_{11114}$ | ispušni vod                                  |
| $A_{11115}$ | prigušivač buke                              |
| $A_{11116}$ | turbopuhalo                                  |
| $A_{11117}$ | sprovodnik zraka                             |
| $A_{11118}$ | agregatni sklop                              |
| $A_{11119}$ | prijenosnik                                  |
| $A_{11120}$ | pumpa za izbacivanje ulja iz blokova         |
| $A_{11121}$ | kućište                                      |
| $A_{11122}$ | pogon agregata                               |
| $A_{11123}$ | pumpa za izbacivanje ulja iz motora          |
| $A_{11124}$ | ubrizgač goriva                              |
| $A_{11125}$ | pumpa visokog tlaka goriva                   |
| $A_{11126}$ | pumpa slatke vode                            |
| $A_{11127}$ | sklop sustava za upućivanje motora           |
| $A_{11128}$ | pričvršćenje motora i pumpe morske vode      |
| $E(T)$      | očekivano vrijeme rada sustava bez kvara     |
| $F(t)$      | funkcija distribucije kvara                  |
| $f(t)$      | funkcija gustoće kvara                       |
| $f_R(t)$    | funkcija gustoće za aktivno vrijeme popravka |

|                  |                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $f_e(t)$         | empirijska funkcija gustoće kvara                                   |
| $k$              | optimalan broj vremenskih intervala                                 |
| $M$              | srednje vrijeme popravaka kvarova                                   |
| $M(t)$           | funkcija pogodnosti održavanja                                      |
| $M_R(t)$         | funkcija popravljivosti motora                                      |
| $n$              | broj kvarova tehničkih sustava                                      |
| $n_2$            | ukupan broj kvarova tehničkih sustava                               |
| $n_j$            | broj slučajeva kada je vrijeme završetka postupaka održavanja $t_j$ |
| $N$              | ukupan broj postupaka održavanja                                    |
| $O_r$            | operativna raspoloživost                                            |
| $P_{uk}$         | ukupna pouzdanost sustava                                           |
| $P$              | snaga motora                                                        |
| $p$              | Pearsonov koeficijent korelacije                                    |
| $P$              | vjerojatnost kvara                                                  |
| $P_i$            | indeks snage motora                                                 |
| $R_s$            | pouzdanost sustava                                                  |
| $R_i$            | pouzdanost $i$ -tog podsustava                                      |
| $R_{M\ 504\ B2}$ | pouzdanost motora M 504 B2                                          |
| $R_{M\ 504\ B2}$ | pouzdanost motora M 504 B2                                          |
| $R(t)$           | pouzdanost tehničkog sustava                                        |
| $R_e(t)$         | empirijska funkcija pouzdanosti                                     |
| $R_t(t)$         | teorijska funkcija pouzdanosti                                      |
| $t_k$            | vrijeme korištenja sustava                                          |
| $t_z$            | vrijeme zastoja                                                     |
| $t$              | vrijeme rada                                                        |
| $t_{am}$         | administrativno vrijeme motora                                      |
| $t_{avkm}$       | aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora                       |
| $t_{avkm}^{sr}$  | srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora               |
| $t_{dk}$         | vrijeme potrebno za defektaciju kvara                               |
| $t_i$            | $i$ -to vrijeme kvara tehničkog sustava                             |
| $t_{im}$         | vrijeme potrebno za funkcionalno ispitivanje nakon montaže          |
| $t_{kodr}$       | vrijeme korektivnog održavanja                                      |
| $t_{dpm}$        | vrijeme demontaže i pripreme                                        |

|                   |                                                     |
|-------------------|-----------------------------------------------------|
| $t_{lm}$          | vrijeme logističke pripreme                         |
| $t_n$             | maksimalno vrijeme                                  |
| $t_{okm}$         | vrijeme otklanjanja kvara i montaže                 |
| $t_{zm}$          | vrijeme zastoja motora                              |
| $T$               | slučajno promjenljiva varijabla                     |
| $\Gamma$          | gama-funkcija                                       |
| $\beta$           | parametar oblika                                    |
| $\gamma$          | parametar položaja                                  |
| $\lambda$         | parametar učestalosti ili intenziteta kvarova       |
| $\lambda(t)$      | funkcija intenziteta kvara                          |
| $\lambda_e(t)$    | empirijska funkcija intenziteta kvara               |
| $\lambda_{ei}(t)$ | empirijska funkcija intenziteta kvara podsustava    |
| $\mu$             | parametar razmjere                                  |
| $\sigma$          | standardna devijacija vremena popravljivosti motora |

## POPIS SLIKA

|            |                                                                                                             |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1  | RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“, RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“                                          | 13 |
| Slika 2.2  | RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“                                                                           | 14 |
| Slika 2.3  | Porinuće RTOP-11 „Kralj Petar Krešimir IV“ 21. ožujka 1992. godine                                          | 15 |
| Slika 2.4  | RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“ u izgradnji                                                                 | 16 |
| Slika 2.5  | RTOP-12 „Kralj Dmitar Zvonimir“ prilikom porinuća 30. ožujka 2001. godine                                   | 16 |
| Slika 2.6  | Sustavi ratnog broda                                                                                        | 26 |
| Slika 2.7  | Podsustavi propulzije na RTOP-u                                                                             | 29 |
| Slika 3.1  | Sklop-klipnjača brzookretnog radijalnog dizelskog motora                                                    | 33 |
| Slika 3.2  | Brzookretni dizelski motor M 504 B2                                                                         | 36 |
| Slika 3.3  | Dokumenti za evidenciju stanja eksploatacije brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2              | 43 |
| Slika 3.4  | Dijagram intenziteta eksploatacije motora M 504 B2                                                          | 49 |
| Slika 3.5  | Prosječno opterećenja na RTOP-11                                                                            | 50 |
| Slika 3.6  | Prosječno opterećenja na RTOP-12                                                                            | 51 |
| Slika 4.1  | Blok-dijagram pouzdanosti RTOP-a                                                                            | 52 |
| Slika 4.2  | Blok-dijagram pouzdanosti pogonskog sustava                                                                 | 53 |
| Slika 4.3  | Blok-dijagram pouzdanosti propulzijskog podsustava                                                          | 54 |
| Slika 4.4  | Prošireni blok-dijagram pouzdanosti propulzijskog podsustava                                                | 54 |
| Slika 4.5  | Prošireni blok-dijagram pouzdanosti dizelskog motora M 504 B2                                               | 55 |
| Slika 4.6  | Kvarovi podsustava brzookretnog dizelskog motora M 504 B2                                                   | 57 |
| Slika 4.7  | Učestalost kvarova na brzookretnom dizelskom motoru M 504 B2                                                | 60 |
| Slika 4.8  | Grafička interpretacija funkcija $R(t)$ i $F(t)$                                                            | 61 |
| Slika 4.9  | Empirijska funkcija gustoće kvara dizelskog motora M 504 B2                                                 | 66 |
| Slika 4.10 | Empirijska funkcija intenziteta kvara $\lambda_e(t)$ dizelskog motora M 504 B2                              | 67 |
| Slika 4.11 | Empirijska funkcija pouzdanosti $R_e(t)$ dizelskog motora M 504 B2                                          | 67 |
| Slika 4.12 | Funkcija gustoće kvarova $f(t)$ za $\gamma = 0, \eta = \text{const.}$ i razne vrijednosti parametra $\beta$ | 69 |
| Slika 4.13 | Funkcija pouzdanosti $R(t)$ za $\gamma = 0$ i $\eta = \text{const.}$ i razne vrijednosti parametra $\beta$  | 69 |
| Slika 4.14 | Funkcija intenziteta kvara za $\gamma = 0$ i $\eta = \text{const.}$ i razne vrijednosti parametra $\beta$   | 70 |
| Slika 5.1  | Identifikacija statističkih distribucija u programu Minitab 16                                              | 72 |
| Slika 5.2  | Analitički rezultati dobiveni pomoću programskog paketa Minitab 16                                          | 73 |

|            |                                                                                                                |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 5.3  | Grafički prikaz rezultata analize pomoću programskog paketa Minitab 16                                         | 73  |
| Slika 5.4  | Usporedni test statističkih distribucija (normalna eksponencijalna, gama i Weibullova)                         | 74  |
| Slika 5.5  | Vrijednosti parametara Weibullove distribucije                                                                 | 75  |
| Slika 5.6  | Funkcije pouzdanosti $R(t)$ za različite parametre $\beta$                                                     | 76  |
| Slika 5.7  | Usporedni dijagram funkcije pouzdanosti $R(t)$                                                                 | 76  |
| Slika 5.8  | Usporedni dijagram funkcije gustoće kvara $f(t)$                                                               | 77  |
| Slika 5.9  | Usporedni dijagram funkcije intenziteta kvara $f(t)$                                                           | 77  |
| Slika 5.10 | Funkcije intenziteta kvarova po podsustavima i ukupna funkcija intenziteta kvara                               | 80  |
| Slika 5.11 | Funkcija pouzdanosti turbopuhala                                                                               | 82  |
| Slika 5.12 | Funkcija pouzdanosti prekretno spojke                                                                          | 83  |
| Slika 5.13 | Funkcija pouzdanosti cilindarskog bloka                                                                        | 84  |
| Slika 5.14 | Funkcija pouzdanosti sklopova sustava za upućivanje                                                            | 85  |
| Slika 5.15 | Funkcija pouzdanosti ispušnog voda                                                                             | 86  |
| Slika 5.16 | Funkcija pouzdanosti ubrizgača                                                                                 | 87  |
| Slika 5.17 | Funkcija pouzdanosti visokotlačne pumpe goriva                                                                 | 88  |
| Slika 7.1  | Zbirne vrijednosti srednjeg aktivnog vremena korektivnog odražavanja motora po podsustavima                    | 97  |
| Slika 7.2  | Postotni udio vremena $t_{avkm}^{sr}$ po podsustavima                                                          | 98  |
| Slika 7.3  | Učestalost srednjeg aktivnog vremena korektivnog održavanja $t_{avkm}^{sr}_j$ po pojedinom elementu podsustava | 102 |
| Slika 7.4  | Empirijska funkcija popravljivosti podsustava motora                                                           | 104 |
| Slika 7.5  | Funkcije gustoće normalne distribucije i funkcije popravljivosti normalne distribucije                         | 105 |
| Slika 7.6  | Usporedni test statističkih distribucija (normalna, eksponencijalna, Weibullova i logonormalna)                | 106 |
| Slika 7.7  | Parametri normalne distribucije                                                                                | 107 |
| Slika 7.8  | Empirijska funkcija i aproksimirana funkcija popravljivosti brzookretnog radijalnog dizelskog motora M 504 B2  | 107 |

## **POPIS TABLICA**

|             |                                                                                     |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablica 2.1 | Osnovni podaci o izgradnji RTOP-11 i RTOP-12                                        | 17  |
| Tablica 3.1 | Pregled pogonskih sati rada brodskog motora                                         | 44  |
| Tablica 3.2 | Opis izvršenih pregleda (remonta)                                                   | 46  |
| Tablica 3.3 | Podaci o kvarovima na motoru (primjer)                                              | 47  |
| Tablica 3.4 | Broj radnih sati motora prema režimima plovidbe                                     | 48  |
| Tablica 3.5 | Prosječno opterećenja motora M 504 B2 na RTOP-11                                    | 49  |
| Tablica 3.6 | Prosječno opterećenja motora M 504 B2 na RTOP-12                                    | 50  |
| Tablica 4.1 | Vremena pojave kvara na podsustavima dizelskog motora M 504 B2                      | 58  |
| Tablica 4.2 | Funkcije distribucije gustoće kvara i očekivano vrijeme rada bez kvara              | 62  |
| Tablica 4.3 | Kumulativna tablica kvarova brodskog dizelskog motora M 504 B2                      | 65  |
| Tablica 4.4 | Empirijske funkcije gustoće kvara, intenziteta kvara i pouzdanosti motora           | 66  |
| Tablica 5.1 | Prikaz kvarova po podsustavima motora M 504 B2                                      | 79  |
| Tablica 5.2 | Vrijednosti empirijske funkcije intenziteta kvara po podsustavima                   | 81  |
| Tablica 6.1 | Kvarovi podsustava motora M 504 B2                                                  | 93  |
| Tablica 7.1 | Srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja pojedinog podsustava motora M 504 B2 | 96  |
| Tablica 7.2 | Srednje aktivno vrijeme korektivnog održavanja motora $t_{avkm}^{sr_j}$             | 101 |
| Tablica 7.3 | Empirijska funkcija popravljivosti podsustava motora                                | 103 |

## PRILOZI

## PRILOG P1

**nep GRUPA**

| Podsustav                  | Otkaz                             | Pripremno vrijeme (h) | Defektacija (h) | Nabava dijelova (dana) | Montaža (popravak) (h) | Ispitivanje (h) | Ostalo                           |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Turbopuhalo                | Rotor                             | 60                    | 8               | 240                    | 80                     | 32              | Generalna revizija 7494          |
|                            | Regulacijski ventil               | 16                    | 3               | 240                    | 32                     | 3               | Servis motora 1260               |
|                            | Labirint                          | 80                    | 5               | 240                    | 120                    | 3               | Servis turbine 340               |
|                            | Usmjerivači plinova               | 40                    | 24              | 240                    | 56                     | 24              | Revizija kopče 748               |
|                            | Brtva                             | 2                     | 1               | 240                    | 3                      | 0               | Regulacija regulatora 180        |
|                            | Vijak za regulaciju               | 6                     | 2               | 240                    | 8                      | 1               | Ispitivanje na probnom stolu 550 |
|                            | Kučiste                           | 32                    | 5               | 240                    | 40                     | 26              | Demontaža motora iz broda 130    |
| Prekretna kopča            | Suport kopče                      | 48                    | 16              | 240                    | 56                     | 16              | Bojanje motora 60                |
|                            | Kučiste kopče                     | 80                    | 6               | 240                    | 110                    | 1               | Montaža na brod 240              |
| Cilindarski blok           | Curenje goriva                    | 8                     | 3               | 240                    | 16                     | 1               | Konzervacija motora 60           |
|                            | Propuštanje kompresije            | 56                    | 8               | 240                    | 80                     | 1               |                                  |
|                            | Emulzija u cilindru               | 56                    | 8               | 240                    | 80                     | 8               |                                  |
|                            | Propuštanje goriva bloka cilindra | 40                    | 16              | 240                    | 70                     | 8               |                                  |
| Klipni sklop               | Oštećenje klipa                   | 70                    | 6               | 240                    | 90                     | 24              |                                  |
| Sustav za upućivanje       | Lom uputnog ventila               | 16                    | 2               | 240                    | 20                     | 3               |                                  |
|                            | Blokiran uputni ventil            | 16                    | 2               | 240                    | 24                     | 3               |                                  |
| Blok pumpe goriva          | Letva goriva                      | 48                    | 8               | 240                    | 68                     | 5               |                                  |
| Regulator brzine vrtnje    | Lom opruge regulatora             | 16                    | 3               | 240                    | 24                     | 1               |                                  |
| Ispušni vod                | Propuštanje emulzije              | 32                    | 1               | 240                    | 54                     | 1               |                                  |
|                            | Puknuće vijka                     | 40                    | 1               | 240                    | 50                     | 1               |                                  |
| Ubrizgač                   | Izgorio rasprskič                 | 9                     | 3               | 240                    | 12                     | 3               |                                  |
|                            | Procurio rasprskič                | 9                     | 3               | 240                    | 14                     | 3               |                                  |
| Pumpa visokog tlaka goriva | Propuštanje goriva                | 32                    | 5               | 240                    | 40                     | 2               |                                  |
|                            | Blokiran mehanizam upravljanja    | 56                    | 8               | 240                    | 60                     | 8               |                                  |

*Ivan Jazvje*  
Ivan Jazvje ing.stroj.  
Voditelj Motorne Radione

*Enzo Sović*  
Enzo Sović dipl.ing.stroj.  
direktor

**nep GRUPA**  
NCP - Grupa d.o.o.  
Obala J. Šižgorića 1 / 22000 Šibenik

ISO 9001  
BUREAU VERITAS  
Certification

CRS

SUPERWACHT REIT GROUP  
ICOMIA

NCP - Grupa d.o.o. / Obala Jerka Šižgorića 1 / 22000 Šibenik / HR – Croatia / [www.nep.hr](http://www.nep.hr)  
t. + 385 (0) 22 312 913 / f. + 385 (0) 22 312 912 / e-mail: [info@nep.hr](mailto:info@nep.hr) / OIB: 27581651826  
MB: 2462281 / MBS: 100013948 / Žiro račun: HR2024110061120000042 - Jadranska banka d.d.  
Šibenik / SWIFT: JADRHR2X / temeljni kapital: 2.046.900,00 HRK / Uprava: Goran Prgin, Klaudija Kulazo, Roko Vuletić

**PRILOG P2**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                |                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|  <b>REMONTNO BRODOGRADILIŠTE ŠIBENIK</b> d. o. o.<br><small>SHIP REPAIR YARD ŠIBENIK<br/>ODJEL TEHNIČKE KONTROLE<br/>TECHNICAL SUPERVISING DEPARTMENT</small>                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Demontažom s motora te rastavljanjem i defektacijom turbopuhala zamijećena je istrošenost labirintnih prstena turbopuhala.<br/> Mogući uzroci su trošenje tokom vremena zbog loše kvalitete ili neadekvatnog pročišćavanja ulja.</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                |                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
| <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;">     </div> <p>Demontažom zbornika plinova turbopuhala i demontažom turbopuhala s motora, detaljnim pregledom ispušnog kola rotora uočeno je oštećenje istog. Daljnjim rastavljanjem turbopuhala primijećeno je zaribavanje ležaja rotora, oštećenje kompresijskog kola rotora te kućišta turbopuhala.</p> <p>Naše mišljenje je da je do zaribavanja ležaja i u vezi s tim oštećenja rotora i kućišta turbopuhala došlo uslijed kontinuiranog niskog tlaka ulja na ležajnu turbine pri eksploataciji u različitim režimima rada motora.</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                |                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Nakon demontaže suporta s spojke, pregledom i defektacijom zapaženo je slijedeće: Tijekom rada motora došlo je do odvijanja jednog vijka na nosaču kandže, a ostala tri vijka su se polomila, te su nosač i kandža otpali u karter spojke. Kandža je oštećena. Veličina oštećenja spojke bit će definirana kod detaljnog rastavljanja i revizije spojke.</p> <p>Mišljenja smo da su vibracije motora zapažene tijekom plovidbe broda nastale uslijed ovog kvara na spojki, neuravnotežen rad spojke.</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                |                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                |                                                      |
| <p>Nakon izvršene demontaže glavnog voda goriva prema blok-pumpama goriva zapaženo je propuštanje goriva na jednom od segmenata fleksibilnih cijevi dobave goriva prema blok-pumpama goriva na bloku broj 3.</p> <p>Mišljenja smo kako je naknadnim dotezanjem konusnog spoja i prisutnim vibracijama motora u normalnoj eksploataciji došlo do puknuća konusa na dosjedu fleksibilne cijevi dobave goriva prema glavnoj dobavi.</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                |                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|  <b>REMONTNO BRODOGRADILIŠTE ŠIBENIK</b> d. o. o.<br><small>SHIP REPAIR YARD ŠIBENIK<br/>ODJEL TEHNIČKE KONTROLE<br/>TECHNICAL SUPERVISING DEPARTMENT</small>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                |                                                      |
| <p>Nakon izvršene demontaže blok-pumpi goriva i cilindarskog monobloka broj 3 te izvršenog tlačnog testa vrućom vodom zapaženo je propuštanje rashladne tekućine kroz dosjed među cilindarskom košuljicom i samog vodenog prostora monobloka.</p> <p>Zaključak je kako je uslijed slabe kvalitete apliciranog kroma i nekvalitetnog postupka apliciranja tvrdog kroma i pripadajućih mehaničkih brtvila u gore navedenom dosjedu došlo do trošenja kontakta i propuštanja rashladne tekućine koja je završila u košuljici motora.</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                                                     |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>                                 |  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | <b>Motor: M 504 B2</b>                                                              |  |
| <b>RTOP</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |  |  |
| <p>Nakon demontaže uputnog ventila i rastavljanja zapaženo je potpuno korodirano tijelo ventila. Ventil je blokirao uslijed depozita željeznog oksida koji je sprječavao slobodno gibanje s ciljem otvaranja i zatvaranja pri protoku komprimiranog zraka.</p> <p>Pregledom cjevovoda komprimiranog zraka kao i uljnih separatora, otkrili smo veće količine vode, pri čemu je došlo do korozije gore navedenog ventila kao i njegovog blokiranja.</p> |  |                                                                                     |  |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b>      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b>                      |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                |                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>            |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                                         |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Nakon izvršene demontaže uputnog ventila 3-cilindarskog monobloka cilindra broj 5, zamijećeno je puknuće uputnog ventila u dosjedu na cilindarskom monobloku.</p> <p>Uslijed neispravnosti nepovratnog ventila na regulatoru brzine vrtnje došlo je do protoka ulja iz uljne pumpe regulatora brzine vrtnje prema uputnim ventilima tijekom kojeg je ulje pod tlakom od 28 bara i više ubacivano u komore za izgaranje pri čemu je došlo do kombinacije znatno većeg tlaka i temperatura nego što je normalno za uputni ventil, koji radi pod komprimiranim zrakom tijekom prekreta motora, što je uzrokovalo njegovo slabljenje i lom.</p> |                                                                                |                                                                |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                                |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>                            |  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | <b>RTOP</b>                                                                    |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>Motor: M 504 B2</b>                                                         |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                                                                                |  |
| <p>Nakon izvršene demontaže blok-pumpi goriva bloka br. 3 zapaženo je oštećenje nazubljenog dijela letve za dobavu goriva.</p> <p>Mišljenja smo da je uslijed blokiranja zakretom elementa VT pumpe goriva (korozijski uslijed vode u gorivu) došlo i do oštećenja nazubljenog dijela letve za dobavu goriva i time do blokiranja kompletnog sustava za upravljanjem količine dobave goriva.</p> |  |                                                                                |  |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b>                 |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                |                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|  <b>REMONTNO BRODOGRADILIŠTE ŠIBENIK</b> d. o. o.<br><small>SHIP REPAIR YARD ŠIBENIK<br/>ODJEL TEHNIČKE KONTROLE<br/>TECHNICAL SUPERVISING DEPARTMENT</small>                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>            |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                |                                                                |
| <p>Pregledom polužja gasa i spojnog mehanizma prema regulatoru vrtnje motora zapaženo je puknuće opruge za povrat letve gasa prema osnovnom gasu motora. Opruga je pukla na mjestu ravnjanja od zadnje zavojnice prema ravnoj zakački, a to je ujedno i mjesto najveće koncentracije naprezanja, što u kombinaciji sa zamorom materijala uz prisutne vibracije može dovesti do ovakvog kvara.</p> <p>Zaključak je kako je uslijed zamora materijala došlo do puknuća gore navedene opruge.</p> |                                                                                |                                                                |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                                                                                |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>                            |  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>RTOP</b>                                                                    |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | <b>Motor: M 504 B2</b>                                                         |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                                                                                |  |
| <p>Demontažom ispušnog voda i provedbom tlačnog testa s vrućom vodom zapaženo je propuštanje rashladne tekućine na unutrašnjoj stjeci ispušnog voda cilindarskog monobloka broj 3 kroz pukotinu uz rub dosjeda prema cilindarskom monobloku.</p> <p>Naše mišljenje je da je do puknuća došlo ili uslijed trošenja pregradnog materijala duple stjenke, uslijed zamora materijala i velike opterećenosti motora, ili uslijed kombinacije gore navedenih pojava i preopterećenja vijka za pričvršćenje ispušnog voda na dosjedu prema cilindarskom monobloku.</p> |  |                                                                                |  |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b>                           |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                |                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>            |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                                         |
|  <p>Nakon demontaže tijela usadnog vijka iz dosjeda ispušnog voda prema cilindarskom monobloku broj 3 i pregledom ostatka vijka zamijećena je krtost materijala vijka kao i izostanak vlačnog istezanja.</p> <p>Naše mišljenje je da je tijekom uporabe vijka došlo do pogrešnog odabira vijka, bez karakteristika za vlačno i toplinsko naprezanje te je uslijed pritezanja i vibracija na motoru došlo do njegovog puknuća unutar ispušnog voda, pri čemu je oštećen i navojni provrt.</p> |                                                                                |                                                                |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                |                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>            |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                |                                                                |
| <p>Nakon demontaže svih 8 ubrizgača za gorivo bloka broj 3 i njihovim ispitivanjem na ispitnom stolu defektacijom je ustanovljena neispravnost ubrizgača goriva broj 5.</p> <p>Mišljenja smo da je uslijed nepravilnog dosjeda igle elementa ubrizgača na konusu rasprskaača došlo do prevelike količine povrata goriva na provrt za višak goriva, koji ima slijed da protiče prema usisnom kolektoru kako bi se omogućilo naknadno izgaranje, što je u određenoj količini i ostvarivo.</p> <p>Prevelika količina povrata goriva rezultirala je i pojavom goriva ispod samog ubrizgača.</p> |                                                                                |                                                                |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                |                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                |                                                      |
| <p>Nakon demontaže svih 8 komada ubrizgača za gorivo bloka broj 3 i ispitivanja rada ubrizgača na ispitnom stolu ustanovljeno je da je ubrizgač broj 5 neispravan uslijed pada pouzdanosti rada sklopa igla-element ubrizgača (rasprskać).</p> <p>Mišljenja smo da je uslijed prevelike količine ubrizganoga goriva došlo do visokih temperatura izgaranja na cilindru broj 5 i uslijed toga do oštećenja samog elementa ubrizgača (rasprskać).</p> |                                                                                |                                                      |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS: Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                                |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>                            |  |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | <b>RTOP</b>                                                                    |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | <b>Motor: M 504 B2</b>                                                         |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Pregledom sustava visokog tlaka i niskog tlaka (dobava) goriva ustanovljeno je sljedeće:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- propuštanje goriva na spoju VT cijevi i VT pumpe goriva (kutni ventil).</li> </ul> <p>Oštećenje konusa na kutnom ventilu kao i konusa na VT cijevi prema ubrizgaču goriva uzrok je propuštanja goriva na sistemu visokog tlaka. Do oštećenja konusa došlo je uslijed korištenja pogrešne tehnologije zamjene VT cijevi goriva.</p> |  |                                                                                |  |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b>                 |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                |                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                | <b>IZVJEŠTAJ</b><br><b>o stanju porivnog motora</b>            |
| <b>OBJEKT</b><br><b>OBJECT</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>RTOP</b>                                                                    | <b>Motor: M 504 B2</b>                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                |                                                                |
| <p>Nakon demontaže blok-pumpi goriva bloka broj 3 pregledom je zapaženo sljedeće:<br/> Oštećenje vijenca VT pumpe goriva za regulaciju količine ubrizganoga goriva.</p> <p>Mišljenja smo da je VT pumpa broj 5 blokirala kompletan blok-pumpi goriva uslijed oštećenja zubaca vijenca za regulaciju dobave goriva (sklop VT pumpa goriva - letva goriva), a to je rezultiralo nedovoljnim zakretom elementa svih pumpi goriva kod izvršenja naloga za odabrani režim rada motora.</p> |                                                                                |                                                                |
| <b>DATUM:</b><br><b>DATE</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>KONTROLOR:</b><br><b>Leonardo Grubelić, dipl. ing.</b><br><b>SUPERVISOR</b> | <b>POTPIS:</b><br><b>Ivan Jazvić, ing.</b><br><b>SIGNATURE</b> |