



Marko Tomašević\*

Marijo Oršulić\*\*

Stipe Belak\*\*\*

ISSN (0469-6255)

(93-100)

## ISTRAŽIVANJE POUZDANOSTI BRODSKOG DIZELSKOG MOTORA RESEARCH OF RELIABILITY OF THE MARINE DIESEL ENGINE

UDK 629.018+621.436:629.12

Prethodno priopćenje

*Preliminary communication*

### Sažetak

Predviđanje pouzdanosti je postupak utvrđivanja numeričke vrijednosti koja pokazuje vjerojatnost strojnog kompleksa ili samog stroja da zadovolji unaprijed postavljane zahtjeve. Osnovni je cilj takvih predviđanja omogućavanje pravodobnog zahvata održavanja.

Rad se bavi istraživanjem operativne pouzdanosti broskog dizelskog motora **M 503A-2**, koji je jedna od jedinica u sustavu broskog pogona. Zahtijevana operativna pouzdanost ovog motora do prvog remonta nakon 600 sati rada iznosi 0.75. Istraživanje se temelji na promatranju ponašanja 69 istih motora u eksploataciji, analizi nastalih kvarova i obavljenih zahvata. Rezultati ukazuju da operativna pouzdanost ovakvog motora u danim uvjetima dostiže vrijednost 0.9326.

*Ključne riječi:* remont, operativna pouzdanost, zalihost, intenzitet kvarova, granice povjerenja

### Summary

The anticipation of reliability is the procedure of defining the numerical value which indicates the probability of the machine complex or the machine itself to satisfy pre-established demands. The basic purpose of these predictions is to enable maintenance operation in time.

The paper deals with the research of the reliability of marine diesel engine M503A-2, which is one of the units included in the ship's propulsion plant.

*The required operational reliability of this engine up to first overhaul after 600 operating hours is 0.75. The research is based on: the observation of 69 identical engines in exploitation, the analysis of failures developed and the operations carried out. The results point out that operational reliability of this engine in specified conditions achieves the value of 0.9326.*

*Key words:* overhauling, operational reliability, redundancy, failure rate, trust limit

### 1. Uvod Introduction

Metodologija predviđanja operativne pouzdanosti temelji se na informacijama u razvojnim fazama sustava i promatranja sustava u eksploatacijskim uvjetima. Kod predviđanja operativne pouzdanosti broskog dizelskog motora potrebno je:

- definirati motor kao sustav;
- definirati kvarove;
- definirati operativne uvjete i uvjete održavanja;
- konstruirati blok dijagrama pouzdanosti;
- postaviti algoritme za izračunavanje pouzdanosti;
- utvrditi intenzitet kvarova za pojedine dijelove motora;
- modificirati indekse kvarova za dijelove motora;
- izračunati pouzdanost motora.

Pri definiranju motora kao sustava potrebno je odrediti njegove cjeline i njihovu međusobnu povezanost. Takve cjeline predstavljaju podsustave motora.

Pod kvarom se podrazumijeva nastanak uvjeta koji motor čini nesposobnim za rad prema svojim utvrđenim parametrima. Mogu se podijeliti na

\*Mr. sci. Marko Tomašević, viši predavač  
Visoka pomorska škola u Splitu

\*\*Dr. sci. Marijo Oršulić, doc.  
Visoka pomorska škola u Splitu

\*\*\*Dr. sci. Stipe Belak, doc.  
Visoka pomorska škola u Splitu

kvarove koji izazivaju nemogućnost korištenja motora, koji umanjuju snagu motora i na one koji ne umanjuju snagu motora, ali mogu biti uzrok nemogućnosti korištenja motora.

Operativni uvjeti određuju uvjete rada motora. Uvjeti održavanja koji utječu na pouzdanost motora moraju biti poznati prije predviđanja pouzdanosti. Pod tim se podrazumijeva: vrijeme zamjene dijelova s poznatim ili procijenjenim vijekom trajanja, provođenje periodičnog održavanja, utvrđivanje dijelova koji se mogu zamijeniti ili popraviti u toku rada motora itd.

Blok dijagram pouzdanosti predstavlja slikovit prikaz funkcionalne povezanosti sustava ili blokova unutar sustava. Pogodno ih je prikazati redoslijedom obavljanja njihove funkcije.

Algoritam za izračunavanje pouzdanosti predstavlja matematički odnos između pouzdanosti sustava i pouzdanosti dijelova sustava prikazanih u blok – dijagramu.

U procesu predviđanja operativne pouzdanosti potrebno je utvrditi intenzitet kvarova dijelova sustava. Dobiva se na osnovi podataka s kojim raspolaže proizvođač, iskustva pri eksploataciji sličnih sustava, statističkih pokazatelja i podataka iz literature. Kod ovog sustava polazi se od pretpostavke konstantnog intenziteta kvara.

Pouzdanost motora dobiva se uvrštavanjem vrijednosti intenziteta kvarova dijelova sustava u algoritam za izračunavanje pouzdanosti u definiranom vremenskom razdoblju.

**1.1. Pretpostavke o konstantnom intenzitetu kvarova**  
*Assumptions on the constant engine failure*

Ako se pretpostavi da su svi intenziteti kvarova komponenta motora konstantni dobivaju se neznatne pogreške u stvarnosti.

Zato se pouzdanost motora sastavljenog od takvih dijelova može izračunati prema eksponencijalnoj distribuciji:

$$R_m = e^{-\lambda_m \cdot t} \tag{1}$$

gdje je:

$R_m$  - pouzdanost motora

$\lambda_m$  - intenzitet kvarova motora

$t$  - zahtjevano vrijeme pouzdanog rada motora

Za slučaj serijskog spoja elemenata sustava,  $\lambda_m$  iznosi:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{2}$$

gdje je  $\lambda_i$  intenzitet kvarova  $i$  – tog dijela motora.

Funkcija intenziteta kvarova  $\lambda_m$  jednaka je omjeru između broja kvarova u vremenskom intervalu  $\Delta t$  i ispravnog broja elemenata u sustavu na kraju tog intervala, tj.:

$$\lambda_m = \frac{n_2(\Delta t)}{[n_1(t - \Delta t)] \cdot \Delta t} \tag{3}$$

gdje je:

$\lambda_m$  - funkcija intenziteta kvarova

$n_2(\lambda t)$  - broj kvarova u vremenskom intervalu

$n_1(t - \lambda t)$  - ispravan broj elemenata na kraju intervala  $\Delta t$ , odnosno do trenutka  $(t - \Delta t)$

U ovakvom slučaju srednje vrijeme između kvarova motora  $M_m$  može se izračunati pomoću izraza.

$$M_m = \frac{1}{\lambda_m} \tag{4}$$

**1.2. Određivanje granice povjerenja za slučaj eksponencijalne distribucije pomoću  $\chi^2$  distribucije**  
*Determination of the trust limit in case of exponential distribution by means of  $\chi^2$  distribution method*

Često se događa da pojedini dijelovi motora nemaju podatke o bilo kakvom kvaru, a poznato je koliko su vremena ti dijelovi bili u funkciji. Ako se pretpostavi da se na dani dio motora može primijeniti eksponencijalna distribucija, moguće je odrediti gornju granicu povjerenja za intenzitet kvarova i to za slučaj kada nije bilo kvara i za slučaj jednog ili većeg broja kvarova.

Donja granica povjerenja za srednje vrijeme između kvara  $\hat{\Theta}$ , za interval povjerenja  $(1 - \alpha)$ , određena je izrazom:

$$\hat{\Theta} \geq \frac{2t_r}{\chi_{\alpha, 2r+2}^2} \tag{5}$$

gdje je:

$t_r$  - ukupno vrijeme rada motora

$r$  - broj kvarova motora

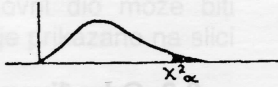
$\chi_{\alpha, 2r+2}^2$  - vrijednost vjerojatnosti koja pripada  $\chi^2$  distribuciji.

Gornja vrijednost intenziteta kvarova  $\hat{\chi}$ , za interval povjerenja  $(1 - \alpha)$ , dobiva se prema izrazu:

$$\hat{\chi} = \frac{\chi_{\alpha, 2r+2}^2}{2t_r} \tag{6}$$

pri čemu se vrijednost  $\chi_{\alpha, 2r+2}^2$  može odrediti za dani interval povjerenja  $(1 - \alpha)$  i poznati broj kvarova prema tablici 1.

Tablica 1. Vrijednosti vjerojatnosti za  $\chi^2$  distribuciju  
 Table 1. Probability values for  $\chi^2$  distribution



$\nu$	$\chi^2_{0,50}$	$\chi^2_{0,30}$	$\chi^2_{0,25}$	$\chi^2_{0,20}$	$\chi^2_{0,10}$	$\chi^2_{0,05}$	$\chi^2_{0,025}$	$\chi^2_{0,01}$	$\chi^2_{0,005}$	$\nu$
1	0,455	1,074	1,323	1,642	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879	1
2	1,386	2,408	2,773	3,219	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597	2
3	2,366	3,665	4,108	4,642	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838	3
4	3,357	4,878	5,385	5,989	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860	4
5	4,351	6,064	6,626	7,289	9,236	11,070	12,832	15,086	16,750	5
6	5,348	7,231	7,841	8,558	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548	6
7	6,346	8,383	9,037	9,803	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278	7
8	7,344	9,524	10,219	11,030	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955	8
9	8,343	10,656	11,389	12,242	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589	9
10	9,342	11,781	12,549	13,442	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188	10
11	10,341	12,899	13,701	14,631	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757	11
12	11,340	14,011	14,845	15,812	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300	12
13	12,340	15,119	15,984	16,985	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819	13
14	13,339	16,222	17,117	18,151	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319	14
15	14,339	17,322	18,245	19,311	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801	15
16	15,338	18,418	19,369	20,465	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267	16
17	16,338	19,511	20,489	21,615	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718	17
18	17,338	20,601	21,605	22,760	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156	18
19	18,338	21,689	22,718	23,900	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582	19
20	19,337	22,775	23,828	25,038	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997	20

### 1.3. Predviđanje operativne pouzdanosti brodskog dizelskog motora M 503A-2\*

*The anticipation of operational reliability of the marine diesel engine M 503A-2\**

Potrebno je na osnovi raspoloživih podataka iz tehničke dokumentacije proizvođača motora i dnevnika stroja obaviti predviđanje operativne pouzdanosti. Također treba utvrditi udovoljava li predviđena operativna pouzdanost unaprijed postavljenim zahtjevima i na osnovi dobivenih rezultata zaključiti je li potrebno poduzimati određene mjere za povećanje pouzdanosti.

Osnovni zahtjev koji se postavlja za pouzdanost motora odnosi se na broj sati rada motora. Motor udovoljava zahtjevima koji se postavljaju za brodske porivne sustave za zalihosti. Karakteristična su dva režima u plovidbi i za vrijeme boravka u luci.

Zahtjeva se da motor radi u vremenu 600 sati do glavnog popravka s pouzdanošću ne manjom od 0,75.

Broj motora na kojima se istražuje pouzdanost iznosi 69.

Uvjeti održavanja propisuju da se održavanje obavlja na tri razine i to:

korektivno održavanje kojim se otklanja nastali kvar,

periodično održavanje koje se sastoji od pregleda, servisa i remonta,

preventivna zamjena dijelova, kad se zamjenjuju dijelovi koji imaju rastući intenzitet kvarova, a kvarovi su uzrok većim zastojsima i troškovima.

### 2. Proračun operativne pouzdanosti brodskog dizelskog motora M503A-2

*The calculation of operational reliability of the marine diesel engine M 503 A-2*

Brodski dizel motor M 503A-2 je brzookretni, višecilindrični, zvjezdasti četvorotaktni motor s prednabijanjem zraka pomoću plinske turbine i turbokompresora. Hlađenje motora je indirektno s rashladnom vodom. Motor ima 42 cilindra koji su smješteni u 7 blokova raspoređenih zvjezdasto. U bloku su utisnute čelične cilindarske košuljice s gumenim brtvljenjem. Koljeničasto vratilo ima 6 rukavaca za povezivanje s klipnjačom. Sklop klipnjače svake sedmocilindrične zvijezde sastoji se od glavne i šest priključnih klipnjača. Priključne klipnjače su spojene s pomoću osovinica utisnutih u povrte glavne klipnjače.

Klipovi su izrađeni od aluminijske legure. Svaki klip ima dva kompresijska i dva uljna prstena. Osovinice klipa su slobodno uložene.

\*Motor je namijenjen za poriv brzih raketnih brodova za vojne potrebe

U cilindarskoj glavi za svaki cilindar su smještena dva usisna i dva ispušna ventila. Ispušni plinovi iz svakog bloka odvođe se u ispušni kolektor, koji se hladi vodom, a iz kolektora plinovi se odvođe u atmosferu preko plinske turbine koja pogoni turbokompresor za prednabijanje.

Snaga motora prenosi se na vratilni niz preko izvrstive prekretno spojke i reduktora.

Stupanj kompresije u cilindru motora je  $15^{\pm 0,5}$ .

Maksimalna snaga motora pri brzini vrtnje koljeničastog vratila  $36,67 \text{ s}^{-1}$  iznosi 2.944 kW pri kojoj motor može raditi najdulje 1 sat. Ovakav režim rada može se koristiti ukupno najviše 5% od predviđenog broja pogonskih sati do generalnog popravka motora.

Puna snaga motora pri plovidbi naprijed pri  $33,33 \text{ s}^{-1}$  iznosi 2.429 kW, kod tlaka okolnog zraka 760 mmHg i relativne vlažnosti 70%. Ovakav režim rada može se koristiti ukupno najviše do 10% od predviđenog broja pogonskih sati do generalnog popravka motora.

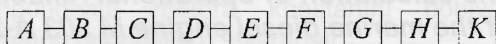
Eksploatacijska snaga motora je 2.208 kW pri brzini vrtnje  $31,67 \text{ s}^{-1}$ . Pri ovom režimu rada motora nema vremenskog ograničenja.

Trajna snaga motora pri plovidbi krmom iznosi 368 kW, a prekrat se obavlja pri brzini vrtnje koljeničastog vratila 12,5 do  $13,33 \text{ s}^{-1}$ .

Najmanja snaga motora iznosi 88 kW pri brzini vrtnje  $9,17 \text{ s}^{-1}$  i to najdulje 2 sata neprekidnog rada.

## 2.1. Blok-dijagram pouzdanosti motora Block diagram of engine reliability

Ako se utvrdi stupanj složenosti dijelova motora, mogu se pojedini dijelovi prikazati kao posebni blokovi podsustava prema slici 1.:



A - turbina                      B - turbokompresor                      C - spojka  
D - blok cilindri                      E - klipovi                      F - glavne klipnjače  
G - klizni ležaji                      H - osovinice klipova                      K - ispušni ventili

Slika 1. Blok-dijagram za motor M 503A – 2  
Figure 1. Block diagram for engine M 503A-2

Dijelovi motora su u serijskoj međuovisnosti. Prema zahtjevu da motor treba raditi 600 sati do glavnog remonta uz pouzdanost 0,75, koristeći jednadžbu (1) može se izračunati intenzitet kvarova:

$$\lambda_m = -\frac{\ln R_m}{t} = -\frac{\ln 0,75}{600}$$

$$\lambda_m = 47,95 \cdot 10^{-5} \text{ kvarova/satu}$$

Srednje vrijeme između kvarova prema izrazu (4) je:

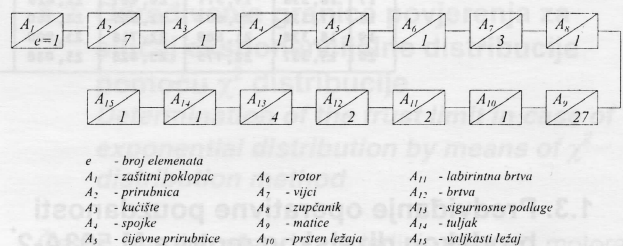
$$M_m = \frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{47,95 \cdot 10^{-5}}$$

$$M_m = 2085,5 \text{ sati}$$

## 2.2. Određivanje intenziteta kvarova za osnovne podsustave Determination of failure rate of basic sub-systems

### 2.2.1. Turbina Turbine

Turbina se sastoji od 15 osnovnih dijelova koji su prikazani na slici 2. Svaki osnovni dio može biti sastavljen iz više elemenata.



Slika 2. Blok-dijagram turbine  
Figure 2. Turbine block diagram

Kvarovi podsustava turbine dogodili su na osnovnom dijelu A<sub>10</sub> nakon 180 sati rada, na dijelu A<sub>12</sub> nakon 237 sati rada i na dijelu A<sub>15</sub> nakon 490,3 sati rada. Ukupni broj elemenata turbine sastoji se iz 54 elementa a za 69 motora to iznosi 3726 elemenata.

Funkcija intenziteta kvarova  $\lambda_m$  prema izrazu (3) za dijelove: A<sub>10</sub>, A<sub>12</sub>, i A<sub>15</sub> je:

$$\lambda_{A_{10}} = \frac{1}{3725 \cdot 180} = 1,491 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{A_{12}} = \frac{1}{3725 \cdot 237} = 1,132 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

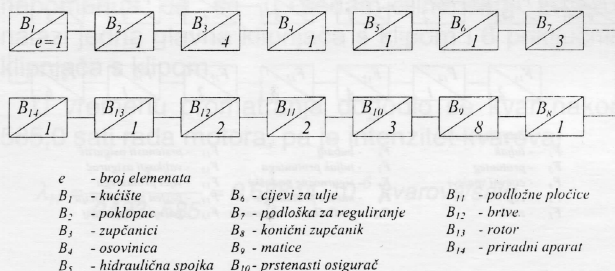
$$\lambda_{A_{15}} = \frac{1}{3725 \cdot 490,3} = 0,547 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Intenzitet kvarova podsustava turbine prema (2) iznosi:

$$\lambda_A = \lambda_{A_{10}} + \lambda_{A_{12}} + \lambda_{A_{15}} = 3,1705 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

## 2.2.2. Turbokompresor Turbo-compressor

Turbokompresor predstavlja podsustav s 14 osnovnih dijelova, a svaki osnovni dio može biti sastavljen iz više elemenata što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Blok-dijagram turbokompresora  
Figure 3. Turbo-compressor block diagram

Kvarovi su se dogodili na osnovnim dijelovima:  $B_4$  nakon 150,3 sati i nakon 327,05 sati,  $B_6$  nakon 285,08 sati,  $B_{12}$  nakon 495,0 sati,  $B_{14}$  nakon 558,15 sati, 577,0 sati i 580,0 sati.

Ukupno je bilo 7 kvarova na 30 elemenata turbokompresora, odnosno za 69 dizel motora ukupni broj elemenata iznosi 2070.

Funkcija intenziteta kvarova  $\lambda_m$  za dijelove  $B_4$ ,  $B_6$ ,  $B_{12}$  i  $B_{14}$  je:

$$\lambda_{B_4} = \frac{2}{2068 \cdot \frac{150,3 + 327,05}{2}} = 4,05203 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{B_6} = \frac{1}{2069 \cdot 285,0} = 1,69588 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{B_{12}} = \frac{1}{2069 \cdot 495,0} = 0,97641 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

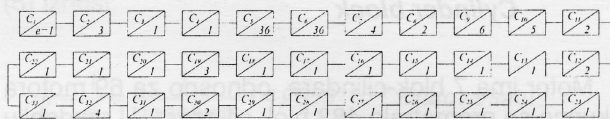
$$\lambda_{B_{14}} = \frac{3}{2067 \cdot \frac{558,15 + 577,0 + 580,0}{3}} = 2,53863 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Intenzitet kvarova podsustava turbokompresora iznosi:

$$\lambda_m = \lambda_m + \lambda_m + \lambda_m + \lambda_m = 9,26295 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

## 2.2.3. Spojka Clutch

Spojka u podsustavu motora sastoji se iz 33 osnovna dijela, a svaki osnovni dio može biti sastavljen iz više elemenata, što je prikazano na slici 4.



$e$ - broj elemenata	$C_{17}$ - čep	$C_{27}$ - puzdžasta spojka
$C_1$ - obujnica	$C_{18}$ - podloška	$C_{28}$ - poluga za uključivanje
$C_2$ - teleskopske cijevi	$C_{19}$ - nosač	$C_{29}$ - radijalno - aksijalni ležaj
$C_3$ - graničnik	$C_{20}$ - tuljak	$C_{30}$ - kućište spojke
$C_4$ - sisaljka ulja	$C_{21}$ - pločica	$C_{31}$ - poluše mehanizmu za plovila klam
$C_5$ - matica	$C_{22}$ - vijak	$C_{32}$ - osovinica reduktora
$C_6$ - vijak	$C_{23}$ - brtva	$C_{33}$ - redukcijski ventil
$C_7$ - brtva	$C_{24}$ - osovinica prekratne spojke	$C_{34}$ - bocu za zrak
$C_8$ - prirubnica	$C_{25}$ - rad. - aks. ležaj	$C_{35}$ - sisaljka za morsku vodu
$C_9$ - ležaj	$C_{26}$ - kućište reduktora	$C_{36}$ - prstenasta brtva
$C_{10}$ - zupčanik	$C_{27}$ - nosač ležaja	$C_{37}$ - poklopac
$C_{11}$ - rasprskat		

Slika 4. Blok-dijagram spojke  
Figure 4. Clutch block diagram

Kvarovi su se dogodili na dijelovima:  $C_{18}$  nakon 304,4 sati, 302,0 sati i 250,0 sati;  $C_{20}$  nakon 202,0 sati i 220,0 sati;  $C_{23}$  nakon 89,5 sati;  $C_{24}$  nakon 102,0 sati i 120,5 sati;  $C_{25}$  nakon 330,0 sati, 430,3 sati i 495,0 sati;  $C_{26}$  nakon 223,0 sati i  $C_{27}$  nakon 228,0 sati.

Ukupno je bilo 13 kvarova na 7 osnovnih dijelova spojke. Ukupni broj elemenata za 69 spojki iznosi 8763.

Funkcija intenziteta kvarova  $\lambda_m$  za dijelove:  $C_{18}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{25}$ ,  $C_{26}$  i  $C_{27}$  je:

$$\lambda_{C_{18}} = \frac{3}{8760 \cdot \frac{304,4 + 320,0 + 250,0}{3}} = 1,17497 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{20}} = \frac{2}{8761 \cdot \frac{202,0 + 220,0}{2}} = 1,081192 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{23}} = \frac{1}{8762 \cdot 89,5} = 1,2752 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{24}} = \frac{2}{8761 \cdot \frac{102,0 + 120,5}{2}} = 2,05199 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{25}} = \frac{3}{8760 \cdot \frac{330,0 + 430,3 + 495,0}{3}} = 0,81844 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{26}} = \frac{1}{8762 \cdot 223,0} = 0,51179 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{C_{27}} = \frac{1}{8762 \cdot 228} = 0,50057 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Intenzitet kvarova spojke iznosi:

$$\lambda_C = \lambda_{C_{18}} + \lambda_{C_{20}} + \lambda_{C_{23}} + \lambda_{C_{24}} + \lambda_{C_{25}} + \lambda_{C_{26}} + \lambda_{C_{27}}$$

$$\lambda_C = 7,41488 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

**2.2.4. Blok cilindar**  
*Cylinder block*

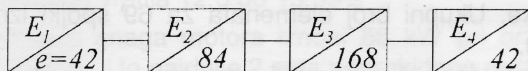
Motor ima 7 blok-cilindara, odnosno za 69 motora ukupno se promatralo 483 blok cilindara. U razdoblju od 600 sati dogodilo se 7 kvarova i to nakon 124, 220, 322, 350, 380, 395 i 571 sati rada.

Intenzitet kvarova blok-cilindra iznosi:

$$\lambda_D = \frac{7}{476 \cdot \frac{124 + 220 + 322 + 350 + 380 + 395 + 571}{7}} = 43,5822 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

**2.2.5. Klip**  
*Piston*

Klip u podsustavu motora sastavljen iz 4 osnovna dijela prema slici 5., a svaki dio sastavljen je iz određenog broja elemenata.



- $e$  - broj elemenata
- $E_1$  - osovina klipa
- $E_2$  - čep
- $E_3$  - prsten
- $E_4$  - tijelo klipa

**Slika 5. Blok-dijagram klipa**  
*Figure 5. Piston block diagram*

Ukupni broj promatranih elemenata podsustava za jedan motor iznosi 336, odnosno za 69 motora promatralo se 23184 elementa podsustava klipa.

Kvarovi su se dogodili na dijelu  $E_1$  nakon 450,3 sati i na dijelu  $E_3$  nakon 461,0 i 495,0 sati rada motora.

Intenzitet kvarova za dijelove  $E_1$  i  $E_3$  je:

$$\lambda_{E1} = \frac{1}{23183 \cdot 450,3} = 0,09579 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

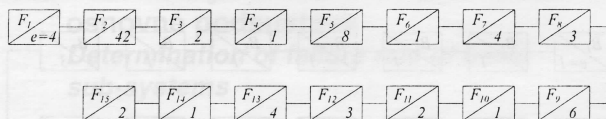
$$\lambda_{E3} = \frac{2}{23182 \cdot \frac{461,0 + 495,0}{2}} = 0,18048 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Intenzitet kvarova za klipove iznosi:

$$\lambda_E = \lambda_{E1} + \lambda_{E2} = 0,27628 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

**2.2.6. Glavna klipnjača**  
*Connecting rod*

Podsustav glavne klipnjače sastavljen je iz 15 osnovnih dijelova, a dijelovi su sastavljeni od jednog ili više elemenata, slika 6.



- $e$  - broj elemenata
- $F_1$  - tuljak
- $F_2$  - protuateg
- $F_3$  - cijevni spojevi
- $F_4$  - čep
- $F_5$  - zatic
- $F_6$  - bubanj
- $F_7$  - tuljak protuatega
- $F_8$  - sigurnosne podloške
- $F_9$  - matice protuatega
- $F_{10}$  - podloška za osiguranje
- $F_{11}$  - prstenasti osigurač
- $F_{12}$  - valjkasti osigurač
- $F_{13}$  - vijci protuatega
- $F_{14}$  - prsten za regulaciju
- $F_{15}$  - gornji i donji ležaj

**Slika 6. Blok-dijagram glavne klipnjače**  
*Figure 6. Piston rod block diagram*

Motor ima 6 glavnih klipnjača s 84 elementa. Za 69 promatranih motora u podsustavu glavnih klipnjača promatra se 34776 elemenata.

Kvarovi su se pojavili na osnovnom dijelu  $F_{11}$  nakon 236,0 sati i na dijelu  $F_{15}$  nakon 380,3 i 490,0 sati rada.

Funkcije intenziteta kvarova  $\lambda_m$  za dijelove  $F_{11}$  i  $F_{15}$  su:

$$\lambda_{F11} = \frac{1}{34775 \cdot 236,0} = 0,12185 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

$$\lambda_{F12} = \frac{2}{34774 \cdot \frac{380,3 + 490,0}{2}} = 0,13217 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Intenzitet kvarova podsustava klipnjače je:

$$\lambda_F = \lambda_{F11} + \lambda_{F15} = 0,25402 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

**2.2.7. Klizni ležaj**  
*Slide bearing*

Motor ima 7 temeljnih kliznih ležaja, pa za 69 motora u podsustavu kliznih ležajeva ima 483 ležaja.

U vremenskom odsječku od 600 sati rada motora dogodio se samo jedan kvar nakon 590 sati, i to zbog puknuća ležaja od zamora materijala.

Intenzitet kvarova podsustava kliznih ležaja iznosi:

$$\lambda_G = \frac{1}{482 \cdot 590} = 3,51642 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

### 2.2.8. Osovinica priključnog klipa *Pin of articulated piston*

Osovinica za spajanje klipa s klipnjačama predstavlja podsustav. Motor se sastoji od 7 blok-cilindara, a u svakom bloku je 6 klipova, pa se podsustav sastoji od 36 elemenata. Za 69 motora ukupno se promatra 2484 elemenata. Potrebno je napomenuti da se u sedam-cilindričnoj zvijezdi nalazi jedna glavna klipnjača s klipom i 6 priključnih klipnjača s klipom.

U vremenu promatranja dogodio se kvar nakon 585,0 sati rada motora, pa je intenzitet kvarova:

$$\lambda_H = \frac{1}{2483 \cdot 585} = 0,68844 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

### 2.2.9. Ispušni ventili *Exhaust valves*

Svaki cilindar ima dva ispušna ventila, pa motor ima ukupno 84 ispušna ventila, odnosno podsustav ispušnih ventila za 69 motora ima 5796 ventila u promatranju.

U vremenu promatranja dogodio se samo jedan kvar nakon 580 sati, jer je došlo do blokiranja loze ventila u radilici radi nakupljanja gareži.

Intenzitet kvara  $\lambda_m$  za ispušne ventile iznosi:

$$\lambda_K = \frac{1}{5795 \cdot 580} = 0,29752 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

### 2.3. Određivanje granice povjerenja rada motora za slučaj eksponencijalne distribucije kvarova *Determination of trust limit of engine operation in case of failure exponential distribution*

U vremenskom odsječku do prvog remonta, tj. do 600 sati, promatralo se ukupno 69 motora. Prema podacima iz dnevnika stroja ukupno vrijeme rada motora iznosilo je 28.909,8 sati. U tom vremenu bilo je 81 726 ispravnih elemenata.

Za interval povjerenja  $(1-\alpha) = 0,75$  dobiva se prema izrazu (5) donja granica povjerenja.

$$\hat{\Theta} \geq \frac{2 \cdot t_r}{\chi_{0,25;2}^2} = \frac{2 \cdot 28909,8}{2,773}$$

$$\hat{\Theta} \geq 20850,92 \text{ sata}$$

Vrijednost  $\chi_{0,25;2}^2$  dobiva se iz tablice 1.

Gornja vrijednost intenziteta kvarova za ispravne elemente u intervalu povjerenja  $(1-\alpha) = 0,75$  prema (6) iznosi:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{\Theta}} = \frac{1}{20850,92} = 4,7959 \cdot 10^{-5} \text{ kvarova/satu}$$

Dobivenu vrijednost ako se podijeli s brojem ispravnih dijelova, dobiva se gornja vrijednost intenziteta kvarova za svaki pojedini element u zadanom intervalu povjerenja:

$$\hat{\lambda}_{el} = \frac{4,7959 \cdot 10^{-5}}{81762} = 5,86827 \cdot 10^{-10} \text{ kvarova/satu}$$

### 2.4. Određivanje operativne pouzdanosti motora *The determination of operational engine reliability*

Koristeći se dobivenom gornjom vrijednosti intenziteta kvarova u zadanom intervalu povjerenja može se dovršiti izračun intenziteta kvarova za svaki pojedini element motora, kako slijedi:

- Za turbinu:

$$\lambda_{Auk} = \lambda_A + n_A \cdot \hat{\lambda} = 3,17005 \cdot 10^{-6} + 3723 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Auk} = 5,3548 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu,}$$

gdje je  $n_{A...K}$  broj elemenata u podsustavu koji su imali kvar.

- Za turbokompresor:

$$\lambda_{Buk} = \lambda_B + n_B \cdot \hat{\lambda} = 9,26295 \cdot 10^{-6} + 2063 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Buk} = 10,4735 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za spojku:

$$\lambda_{Cuk} = \lambda_C + n_C \cdot \hat{\lambda} = 7,41488 \cdot 10^{-6} + 8750 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Cuk} = 12,5496 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za cilindre:

$$\lambda_{Duk} = \lambda_D + n_D \cdot \hat{\lambda} = 43,5822 \cdot 10^{-6} + 476 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Duk} = 43,86153 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za klipove:

$$\lambda_{Euk} = \lambda_E + n_E \cdot \hat{\lambda} = 0,27628 \cdot 10^{-6} + 23181 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Euk} = 13,87952 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za klipnjače:

$$\lambda_{Fuk} = \lambda_F + n_F \cdot \hat{\lambda} = 0,25402 \cdot 10^{-6} + 34773 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Fuk} = 20,65975 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za klizne ležajeve:

$$\lambda_{Guk} = \lambda_G + n_G \cdot \hat{\lambda} = 3,51642 \cdot 10^{-6} + 428 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Guk} = 3,79927 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za osovinice klipa:

$$\lambda_{Huk} = \lambda_H + n_H \cdot \hat{\lambda} = 0,68844 \cdot 10^{-6} + 2483 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Huk} = 2,14553 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

- Za ispušne ventile:

$$\lambda_{Kuk} = \lambda_K + n_K \cdot \hat{\lambda} = 0,29752 \cdot 10^{-6} + 5795 \cdot 5,86827 \cdot 10^{-10}$$

$$\lambda_{Kuk} = 3,69818 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu.}$$

Predviđanje vrijednosti intenziteta kvarova za dijelove motora iznosi:

$$\lambda_m = (5,3548 + 10,4735 + 12,5496 + 43,86153 + 13,87952 + 20,65975 + 3,79927 + 2,14553 + 3,69818) \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_m = 116,42168 \cdot 10^{-6} \text{ kvarova/satu}$$

Srednji broj sati između kvarova motora prema izrazu (4) iznosi:

$$M_m = \frac{1}{\lambda_m} = 8589,46 \text{ sati}$$

Ukupna operativna pouzdanost motora iznosi:

$$R_m = e^{-\lambda_m \cdot t} = e^{-0,0697593}$$

$$R_m = 0,9326$$

### 3. Zaključak/Conclusion

Iz ovog istraživanja može se zaključiti da je dobivena operativna pouzdanost povoljnija od one zahtijevane, a koja iznosi 0,75.

Analizom intenziteta kvarova podsustava dizelskog motora i elemenata u podsustavu dolazi se do zaključka da su turbina i turbokompresor najosjetljiviji dijelovi motora. Najčešći uzroci kvarova na tom podsustavu su:

- ulazak čestica materijala kroz zaštitnu mrežicu privodnog sustava

- lomovi zbog vibracija motora

- lomovi zbog slabe kvalitete lijevanja.

Da se spriječi ulaz materijala kroz zaštitnu mrežicu trebalo bi dodati još jednu zaštitnu mrežicu uz postojeću.

Zbog vibracija dizelskog motora dolazi do vibracija turbopuhala i pojave dodatnih naprezanja što je dovelo do loma lopatica i to najčešće blizu njenog korijena. Kako bi se umanjili mogući lomovi bilo bi dobro ugraditi ublaživač vibracija i projektirati lopatice s većim presjecima u korijenu.

Budući da oštećenja privodnog sustava mogu biti uzrokom i većih oštećenja motora ukoliko metalni dijelovi dođu u cilindar motora, valja razmotriti mogućnost zamjene turbopuhala nakon 70 sati rada motora.

Sve to ukazuje na potrebu traženja novih tehnoloških i konstrukcijskih rješenja pri izradi turbopuhala.

### Bibliografija/Bibliography

[1] J. LOVRIĆ, Osnove brodske terotehnologije, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1989.

[2] J. LOVRIĆ, Pristup izboru porivnog motora radi optimalizacije iskorištavanja trgovačkog teretnog broda, Naše more 41(5-6)/94, Dubrovnik, 1994.

[3] N. VUJANOVIĆ, Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Vojno izdavački i novinski centar, Beograd, 1987.

[4] G. IVANOVIĆ i D. STANIVUKOVIĆ, Pouzdanost tehničkih sistema, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 1983.

[5] Instrukcijske knjige za motor M 503A – 2, Dnevnik stroja, tehnička dokumentacija o održavanju motora.

Rukopis primljen: 20.12.1999