

*mr.sc. Suzana Jakovljević, dipl.ing., FSB, Zagreb*  
*mr.sc. Danko Gugić, dipl.ing., FSB, Zagreb*

## **DOPRINOS ODABIRU PROPULZIJSKOG SUSTAVA PATROLNIH BRODOVA ZA JADRAN**

### **Sažetak**

Odabir najpovoljnijeg propulzijskog sustava, s obzirom na cijeli niz vanjskih faktora koji utječu na rad tog sustava te stoga i na funkcionalnost i operativnost ratnog broda u cjelini, vrlo je zahtijevan posao. U ovom se radu razmatraju tri kriterija za odabir optimalnog propulzijskog sustava: maksimalna pouzdanost, minimalni ukupni troškovi patrolnog broda po nautičkoj milji kroz deset godina te minimum omjera ukupnih troškova patrolnog broda po nautičkoj milji kroz deset godina i pouzdanosti propulzijskog sustava. Varijabla pouzdanosti u spregi troškova i pouzdanosti vrlo malo utječe na nju zbog svojih visokih numeričkih vrijednosti te se kao najprimjereniji kriterij za odabir optimalnog propulzijskog sustava preporuča kriterij minimalnih ukupnih troškova patrolnog broda po nautičkoj milji kroz deset godina.

*Ključne riječi: patrolni brod, propulzijski sustav, optimizacija, dizelski motori, propulzori*

## **A CONTRIBUTION TO SELECTING THE PROPULSION SYSTEM OF PATROL SHIPS FOR THE ADRIATIC SEA**

### **Summary**

The selection of the optimal propulsion system with reference to a whole series of external factors which affect the work of propulsion system and the functionality and operability of a war ship is a very demanding task. This work has considered three criteria for the selection of the optimal propulsion system: maximum reliability of the propulsion system, minimum overall costs of the patrol ship per nautical mile over a period of ten years, and the minimum ratio between overall costs of the patrol ship per nautical mile over a period of ten years and per reliability of the propulsion system. The reliability variable in the interaction of the costs and reliability has a very low influence because of its high numerical values. Therefore, the criterion of minimum overall costs of the patrol ship per nautical mile over a period of ten years is recommended as the best one in the selection of the optimal propulsion system.

*Keywords: patrol ship, propulsion system, optimization, diesel engine, propellers*

## 1. Uvod

S obzirom na zemljopisno–klimatske uvjete kao i ekonomsku moć pojedine zemlje patrolni brodovi mogu biti osnova njezine flote. Ovo naročito vrijedi za Republiku Hrvatsku, jer je Jadran zatvoreno more s mnogo otoka i s relativno malim vjetrovalnih značajkama. Namjera je referata dati doprinos poboljšanju performansi patrolnih brodova definiranjem metodologije odabira propulzijskog sustava. U današnje vrijeme postavljaju se zahtjevi za što pouzdanijim i bržim patrolnim brodovima, te sa što većim doplovom. Međusobna ovisnost i uvjetovanost taktičko-tehničkih zahtjeva postavlja pred projektanta broda i projektanta propulzijskog sustava rješavanje dva zadatka. Projektant broda, rješavajući prvi zadatak, vodi računa o veličini broda, rasporedu prostora i masa, doplovu i brzinama, krstarećoj i vršnoj brzini, a s projektantom propulzijskog sustava o konfiguraciji propulzijskog sustava. Projektant propulzijskog sustava, pri rješavanju drugog zadatka, pak vodi računa o odabiru pogonskih strojeva i propulzora, mogućnostima ugradnje pogonskih strojeva i propulzora, standardu gustoće uređaja u strojarnici, potrošnji goriva, investicijskim troškovima i troškovima održavanja propulzijskog sustava. Za potrebe ovog referata prvi zadatak riješen je osnivanjem reprezentativnih patrolnih brodova, forme SKLAD razvijene u Brodarskom institutu u Zagrebu, pomoću kompjuterskog programa SKLAD [1], varirajući masu normalne istisnine od 150 do 350 tona za tri doplova: 800 nm, 1200 nm i 1600 nm. Duljine doplova određene su u [2], gdje patrolni brod kreće na zadatak iz šibenske luke na područje patroliranja između otoka Biševa i Palagruže, a plovi brzinom krstarenja  $v_k = 18\text{čv}$  i vršnom brzinom  $v_t = 30\text{čv}$ . Spomenutim programom obrađeno je oko 45000 brodova, a u kombinacijama doplova i broja brodskih vijaka odabrano je devet reprezentativnih brodova (tri doplova x tri broja vijaka = devet kombinacija - Tablica 1) koji imaju minimalne ukupne desetgodišnje životne troškove. Za svaki reprezentativni brod programom WAG [3] određena je geometrija brodskog vijaka i potrebna snaga motora, koja je u granicama od 1120 kW do 2320kW.

**Tablica 1:** Karakteristike reprezentativnih brodova; **A** – patrolni brodovi s dva brodska vijka i dva motora,

**B** - patrolni brodovi s tri brodska vijka i tri motora, **C** – patrolni brodovi s četiri brodska vijka i četiri motora doplova

**Table 1:** Particulars of representative boats; **A** – patrol boats with two screws and engines, **B** – patrol boats with three screw and engines, **C** – patrol boats with four screw and engines

|                |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $D_p$ , nm     | 800                  | 1200                 | 1600                 | 800                  | 1200                 | 1600                 | 800                  | 1200                 | 1600                 |
| tip broda      | <b>A<sub>1</sub></b> | <b>A<sub>2</sub></b> | <b>A<sub>3</sub></b> | <b>B<sub>1</sub></b> | <b>B<sub>2</sub></b> | <b>B<sub>3</sub></b> | <b>C<sub>1</sub></b> | <b>C<sub>2</sub></b> | <b>C<sub>3</sub></b> |
| $L_{oa}$ , m   | 40                   | 42                   | 44                   | 40                   | 43                   | 44                   | 40                   | 44                   | 45                   |
| $L_{pp}$ , m   | 36,92                | 38,83                | 40,74                | 36,92                | 39,79                | 40,74                | 36,92                | 40,74                | 41,70                |
| $B_{WL}$ , m   | 6,59                 | 6,75                 | 6,85                 | 6,65                 | 6,80                 | 6,91                 | 6,65                 | 6,85                 | 7,01                 |
| $H_o$ , m      | 3,83                 | 3,93                 | 4,02                 | 3,83                 | 3,97                 | 4,02                 | 3,83                 | 4,02                 | 4,07                 |
| $T_{WL}$ , m   | 1,57                 | 1,69                 | 1,71                 | 1,58                 | 1,70                 | 1,73                 | 1,58                 | 1,71                 | 1,75                 |
| $C_B$          | 0,42                 | 0,40                 | 0,40                 | 0,42                 | 0,40                 | 0,41                 | 0,43                 | 0,40                 | 0,40                 |
| $\Delta_N$ , t | 167,16               | 184,55               | 199,52               | 171,52               | 191,61               | 207,55               | 175,47               | 198,86               | 214,97               |
| $P_{MCR}$ , kW | 4616,38              | 4958,08              | 5060,25              | 4928,70              | 5174,62              | 5508,2               | 5170,66              | 5397,30              | 5711,31              |
| $R_k$ , N      | 93319,52             | 91475,07             | 90233,49             | 91520,14             | 90893,66             | 95621,24             | 98726,74             | 90233,49             | 94155,24             |
| $R_t$ , N      | 139536,1             | 149864,2             | 152952,6             | 144257,5             | 151455,4             | 161219,0             | 146693,0             | 152952,6             | 162031,5             |

U rješavanju drugog zadatka teži se propulzijskom sustavu nižih investicijskih troškova, manje mase, manjeg potroška goriva i što veće pouzdanosti što je glavni zadatak ovog referata. Prema postojećim strojarnicama i razmještaju motora u njima i zbog novih dostignuća u konstrukciji i gradnji motora, posebno dobrog rada motora u niskim režimima, razmatrat će se dizelski motori u linijskom pogonskom sustavu. Svi motori na jednom brodu jednakih su snaga tako da se pogon pri krstarenju ostvaruje smanjivanjem snage i brzine vrtnje motora, a ne isključivanjem iz rada pojedinih motora. Kao propulzori razmatrat će se brodski vijci s krilima fiksnog uspona i vodomlazni propulzori. Prema postojećim projektima već izgrađenih patrolnih brodova uzeti su u obzir brodovi koji imaju dva, tri i četiri brodska vijka. Jedan brodski vijak se ne uzima u razmatranje zbog nedovoljnih manevarskih mogućnosti te nepouzdanosti u slučaju kvara ili oštećenja uslijed borbenog djelovanja. Ne razmatra se niti više od četiri brodska vijka zbog nemogućnosti smještaja kako vijaka tako i motora. Kao kriterije odabira optimalnog propulzijskog sustava razmatrat će se tri funkcije cilja koje će sadržavati: pouzdanost propulzijskog sustava, investicijske i eksploatacijske troškove propulzijskog sustava i njihovu kombinaciju u ovisnosti o pređenim nautičkim miljama kroz deset godina te predložiti najprimjereniji kriterij za odabir.

## 2. Definiranje funkcije cilja

### 2.1. Scenariji i funkcije cilja

Osnovni elementi propulzijskog sustava su propulzor (brodski vijak s krilima fiksnog uspona ili vodomlazni propulzor), kormilarski uređaj (u slučaju izvedbe s brodskim vijkom), osovinski vod, reduktor motor te oni čine liniju u propulzijskom sustavu broda. Kako pojava kvarova izbacuje jednu ili više linija iz rada iz zadaće patrolnog broda slijede dva scenarija [2]:

- *Scenarij 1*- Sve linije su u funkciji i brod može u potrebnom trenutku ostvariti vršnu brzinu.

- *Scenarij 2*- Kada dođe do kvara na jednoj ili više linija patrolni brod ne može ostvariti vršnu brzinu. Ako s preostalim linijama ostvaruje brzinu krstarenja on može ostati na stazi do kraja misije ili dok mu ne dođe zamjena. Kod propulzijskih sustava razmatranih u ovom radu, u svim doplovima, dovoljno je da bar jedna linija funkcionira pa da se ostvari brzina krstarenja.

Za odabir optimalnog propulzijskog sustava u oba scenarija razmatrane su tri funkcije cilja [2]:

1. Funkcija cilja  $F_1$  vrijednost je varijable pouzdanosti  $R$ .  

$$F_1 = R \quad (1)$$

Što je veća numerička vrijednost funkcije cilja  $F_1$  propulzijski sustav je bolji.

2. Odabir optimalnog propulzijskog sustava prikazuje se funkcijom cilja  $F_2$  u kojoj su varijable investicijski troškovi ( $C_M$  – nabavna cijena motora,  $C_P$  - nabavna cijena propulzora,  $C_{KU}$  - nabavna cijena kormilarskog uređaja) i eksploatacijski troškovi ( $T_o$  - troškovi održavanja propulzijskog sustava,  $T_g$  - troškovi potrošnje goriva) patrolnog broda po broju nautičkih milja  $bnm$ . Pri odabiru optimalnog propulzijskog sustava traži se minimum funkcije  $F_2$ .

$$F_2 = ((C_M + C_P + C_{KU} + T_o + T_g) / bnm) \quad (2)$$

3. Sprega ukupnih troškova patrolnog broda i pouzdanosti propulzijskog sustava prikazana je funkcijom cilja  $F_3$  koja ima za varijable investicijske i eksploatacijske troškove

patrolnog broda po broju nautičkih milja i pouzdanost propulzijskog sustava. Kako je poznato da su troškovi i pouzdanost obrnuto proporcionalni, funkcija cilja  $F_3$  omjer je ukupnih troškova broda i pouzdanosti propulzijskog sustava prikazanih sljedećim izrazom:

$$F_3 = ((C_M + C_P + C_{KU} + T_O + T_g) / bnm) / R \quad (3)$$

Optimalan propulzijski sustav je onaj koji ima minimum funkcije cilja.

Kod sve tri funkcije cilja parametri su brzine, broj propulzora i doplovi i sve cijene i troškovi izraženi su u USD.

## 2.2. Pouzdanost propulzijskih sustava

Pri analizi pouzdanosti nekog kompleksnog sustava, nužno je razložiti taj sustav na funkcionalne cjeline te ih promatrati u dvije osnovne konfiguracije, rednu i paralelnu [4]:.

U ovom radu propulzijski sustav u *Scenariju 1* promatra se kao redna, a u *Scenariju 2* kao paralelnu konfiguracija linija.

Pouzdanosti sustava prikazat će se u funkciji vremena  $t$  i inteziteta kvarova  $\lambda$ . Jednadžba koja je najviše u upotrebi pri praktičnoj primjeni teorije pouzdanosti je eksponencijalna funkcija prema [4]:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Linija propulzijskog sustava sastoji se od propulzora, kormilarskog uređaja (kod brodskog vijka), osovinog voda, reduktora i motora. Kako je najveća i najznačajnija stavka u ukupnoj pouzdanosti propulzijskog sustava – pouzdanost motora, s njegovom vrijednosti obavit će se daljnja analiza. Intezitet kvarova  $\lambda$  za motor, prema [5], iznosi 0,0018 kvarova po danu odnosno 0,000075 kvarova po satu. Taj podatak dan je za trgovačke brodove pa ga treba uzeti s rezervom jer su danas vrijednosti inteziteta kvarova za patrolne brodove manje. Intezitet kvarova  $\lambda$  pretpostavlja se isti za vrijeme u plovidbi vršnom brzinom i brzinom krstarenja.

### 2.2.1. Pouzdanost propulzijskog sustava u *Scenariju 1*

U ostvarivanju ovog scenarija neophodno da svih  $n$  linija bude ispravno i pouzdanost sustava prema [4] definirana je sljedećim izrazom:

$$R(t) = R_1(t)R_2(t)\dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (5)$$

gdje je:

$R_i$ - pouzdanost tj. vjerojatnost uspješnog funkcioniranja  $i$ -te linije,

$R$ - pouzdanost čitavog brodskog propulzijskog sustava,

$n$  – broj motora odnosno linija.

Kako su pouzdanosti svih motora iste pouzdanost propulzijskog sustava je:

$$R(t) = e^{-n\lambda t} \quad (6)$$

Uvrstivši za intezitet kvarova  $\lambda = 0,000075$ , te mjenjajući vrijeme  $t$  i broj linija  $n = 2,3,4$  dobivaju se vrijednosti za pouzdanost propulzijskog sustava patrolnog broda prikazane u Tablici 2:

**Tablica 2:** Pouzdanost propulzijskog sustava patrolnog broda pri doplovu 800 nm, 1200 nm i 1600 nm,  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$  su pouzdanosti za sustave s dvije, tri i četiri linije

| $t$ , h | Doplov 800 nm |              |              | Doplov 1200 nm |              |              | Doplov 1600 nm |              |              |
|---------|---------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
|         | $R_2$         | $R_3$        | $R_4$        | $R_2$          | $R_3$        | $R_4$        | $R_2$          | $R_3$        | $R_4$        |
| 80      | 0,988         | 0,982        | 0,976        | 0,988          | 0,982        | 0,976        | 0,988          | 0,982        | 0,976        |
| 120     | 0,982         | 0,973        | <b>0,964</b> | 0,982          | 0,973        | <b>0,964</b> | 0,982          | 0,973        | <b>0,964</b> |
| 160     | 0,976         | <b>0,964</b> | 0,953        | 0,976          | <b>0,964</b> | 0,953        | 0,976          | <b>0,964</b> | 0,953        |
| 200     | 0,9704        | 0,956        | 0,941        | 0,9704         | 0,956        | 0,941        | 0,9704         | 0,956        | 0,941        |
| 240     | <b>0,965</b>  | 0,947        | 0,929        | <b>0,965</b>   | 0,947        | 0,929        | <b>0,965</b>   | 0,947        | 0,929        |
| 280     | 0,959         |              |              | 0,959          |              | 0,959        |                |              |              |

Vrijednost 0,96 za pouzdanost propulzijskog sustava uzima se kao donja granica nakon čega se trebaju obaviti zahvati preventivnog održavanja pa se tako govori o pouzdanosti uz zahvate. Ta je vrijednost dana za pouzdanost propulzijskih sustava trgovačkih brodova [4] i u ovom slučaju treba se uzeti s rezervom jer je vrijednost za pouzdanost kod patrolnih brodova veća. Kojim zahvatima će se pristupiti u održavanju vidjet će se iz kontrole razine pouzdanosti određenih elemenata motora. Nakon revizije motora i njegovih dijelova on dobiva epitet za sigurnost "kao da je novi" i daje opravdanje da se pouzdanost predstojećeg putovanja počne promatrati od nultog vremena tj. ne pribrojavaju mu se sati s putovanja na putovanje.

Uvidom u Tablicu 2 može se zaključiti da za postizanje granične pouzdanosti pri različitim doplovima za isti broj linija treba i isti broj sati. Tako će zahvati preventivnog održavanja kod  $R_2$  biti nakon 240 sati, kod  $R_3$  nakon 160, a kod  $R_4$  nakon 120 sati u svim razmatranim doplovima.

### 2.2.2 Pouzdanost propulzijskog sustava u *Scenariju 2*

Izračunavanje pouzdanosti propulzijskog sustava u ovom scenariju pretpostavlja paralelnu konfiguraciju od ukupno  $n$  linija, gdje najmanje jedna linija mora biti ispravna da bi sustav uspješno funkcionirao.

Pouzdanost sustava u slučaju paralelne konfiguracije linija prema [4] je:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (7)$$

gdje je  $R_i$  pouzdanost pojedine linije.

Izraz (7) za sustav koji se sastoji od  $n$  linija koji imaju eksponencijalnu raspodjelu vremena do otkaza, može se napisati u sljedećem obliku:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}] \quad (8)$$

Pouzdanost sustava za dvo-, tro- i četverolinijski propulzijski sustav patrolnog broda, uz  $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda$ , je:

$$R_2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (9)$$

$$R_3 = 3 \cdot e^{-\lambda t} - 3 \cdot e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t} \quad (10)$$

$$R_4 = 4 \cdot e^{-\lambda t} - 6 \cdot e^{-2\lambda t} + 4 \cdot e^{-3\lambda t} - e^{-4\lambda t} \quad (11)$$

Vrijednosti izračunate po gornjim izrazima dane su Tablici 3.

**Tablica 3:** Pouzdanost propulzijskog sustava patrolnog broda Scenarija 2, H – broj sati broda provedenih u plovidbi

| Doplov  | H    | $R_2$  | $R_3$  | $R_4$  |
|---------|------|--------|--------|--------|
| 800 nm  | 1425 | 0,9897 | 0,9989 | 0,9998 |
| 1200 nm | 2025 | 0,980  | 0,9972 | 0,9996 |
| 1600 nm | 2625 | 0,968  | 0,994  | 0,9989 |

Najveću pouzdanost propulzijskog sustava, u ovom scenariju, ima brod s četiri linije. Pouzdanost sva tri propulzijska sustava u ovom scenariju je vrlo velika, više od 0,96. Razlika između najmanje numeričke vrijednosti za pouzdanost kod dvolinijskog i najveće kod četverolinijskog broda je oko 4%.

### 2.2.3 Pouzdanost propulzijskog sustava patrolnog broda s vodomlaznom propulzijom

S obzirom na dimenzije krmenog zrcala moguće je ugraditi samo dva vodomlazna propulzora. Pouzdanost će se odrediti samo za *Scenarij 1*, kada su u pogonu obje linije jer se u *Scenariju 2*, kada radi jedna linija, javljaju veliki problemi s držanjem kursa. Što bi se događalo u *Scenariju 2* mogla bi biti jedna od tema daljnjih istraživanja.

Pouzdanost za motor kod broda s vodomlaznom propulzijom je jednaka kao kod linija s brodskim vijcima a razlika je u pouzdanosti vodomlaznog propulzora koja je manja nego kod broskog vijka. Na osnovi razgovora s korisnicima pouzdanost broskog vijka s kormilarskim uređajem i osovinskim vodom vrlo je visoka tako da se promatra samo vrijednost za pouzdanost motora dok se kod vodomlaznog propulzora to ne može učiniti zbog njegove složene izvedbe. Pouzdanost vodomlaznog propulzora s osovinskim vodom je  $R_{ml} = 0,85$ .

Pouzdanost za liniju mlazni propulzor – motor je:

$$R_{ml} = 0,997 \cdot 0,85 = 0,847 \quad (12)$$

odnosno za dvije linije:

$$R_{ml1} = R_{ml}^2 = 0,717. \quad (13)$$

## 3. Analiza rezultata i odabir propulzijskog sustava

### 3.1. Usporedba propulzijskih sustava broda s vijčanim i mlaznim pogonom

Radi usporedbe propulzijskih sustava na reprezentantni brod **A1** [3] ugrađeni su vodomlazni propulzori te je on korišten u daljnjoj analizi. Na reprezentantne brodove **A2** i **A3** nije moguće smjestiti vodomlazne propulzore zbog malog gaza, a na reprezentantne brodove tipa **B** i **C** zbog male veličine zrcala.

**Tablica 4:** Ukupni troškovi i vrijednost funkcije cilja za propulzijski sustav dvovijčanog broda i propulzijski sustav broda s dva vodomlazna propulzora pri brzini krstarenja 18 čv, vršnoj brzini 30 čv i doplovu 800 nm u Scenariju 1

| Naziv                                | Propulzijski sustav dvovijčanog broda | Propulzijski sustav broda s dva vodomlazna propulzora |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Ukupni troškovi patrolnog broda, USD | 4.389.857                             | 5.356.738   |
| Vrijednost funkcije cilja $F_1$      | 0,982                                 | 0,717   |
| Vrijednost funkcije cilja $F_2$      | 17,55                                 | 21,42   |
| Vrijednost funkcije cilja $F_3$      | 17,87                                 | 29,87   |

Usporedbom podataka iz Tablice 4 za vijčanu i vodomlaznu propulziju zaključuje se:

- kod funkcije cilja  $F_1$  veću numeričku vrijednost za pouzdanost propulzijskog sustava ima dvovijčani brod;

- kod funkcije cilja  $F_2$ , dvovijčani brod ima manje ukupne troškove po nautičkoj milji kroz deset godina odnosno manju vrijednost funkcije cilja  $F_2$  od broda s dva vodomlazna propulzora;

- kod funkcije cilja  $F_3$ , koji je spreg minimalnih ukupnih troškova patrolnog broda po nautičkoj milji i najveće pouzdanosti propulzijskog sustava i izražen funkcijom cilja  $F_3$ , brod s vijčanim pogonom ima manju vrijednost  $F_3$  od vrijednosti dobivene kod broda s vodomlaznom propulzijom.

Kod sve tri funkcije cilja može se zaključiti da je brod s vijčanom propulzijom na doplovu 800 nm, pri brzini krstarenja 18 čv i vršnoj brzini 30 čv, bolji izbor.

### 3.2. Usporedba propulzijskih sustava brodova dvo-, tro- i četverovijčanog pogona

U Tablici 5 dani su ukupni troškovi i vrijednosti funkcije cilja za brodove s vijčanim propulzijskim sustavom za *Scenarij 1* i *Scenarij 2*.

**Tablica 5:** Vrijednosti funkcije cilja i ukupnih troškova za doplove 800 nm, 1200 nm i 1600 nm za propulzijske sustave s dvo-, tro- i četverovijčanim pogonom u Scenariju 1 i Scenariju 2

| Doplov, nm                  | 800       |           |           | 1200      |           |           | 1600      |           |           |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                             | 2         | 3         | 4         | 2         | 3         | 4         | 2         | 3         | 4         |
| <b>Scenarij 1</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Ukupni troškovi, USD        | 4.389.857 | 4.656.074 | 4.488.939 | 5.364.835 | 5.742.408 | 5.945.686 | 6.229.497 | 6.901.114 | 7.228.103 |
| Vrijednost fun. cilja $F_1$ | 0,982     | 0,973     | 0,964     | 0,982     | 0,973     | 0,964     | 0,988     | 0,982     | 0,976     |
| Vrijednost fun. cilja $F_2$ | 17,55     | 18,62     | 17,95     | 14,96     | 16,02     | 16,58     | 13,36     | 14,80     | 15,50     |
| Vrijednost fun. cilja $F_3$ | 17,87     | 19,13     | 18,62     | 15,24     | 16,46     | 17,30     | 13,52     | 15,07     | 15,88     |
| <b>Scenarij 2</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Ukupni troškovi, USD        | 4.389.857 | 4.656.074 | 4.488.939 | 5.364.835 | 5.742.408 | 5.945.686 | 6.229.497 | 6.901.114 | 7.228.103 |
| Vrijednost fun. cilja $F_1$ | 0,989     | 0,999     | 0,999     | 0,980     | 0,997     | 0,999     | 0,968     | 0,994     | 0,999     |
| Vrijednost fun. cilja $F_2$ | 17,55     | 18,62     | 17,95     | 14,96     | 16,02     | 16,58     | 13,36     | 14,80     | 15,50     |
| Vrijednost fun. cilja $F_3$ | 17,75     | 18,63     | 17,97     | 15,27     | 16,07     | 16,60     | 13,80     | 14,89     | 15,52     |

Analizom rezultata istraživanja prikazanih u Tablici 5 dolazi se do sljedećih zaključaka:

### Scenarij 1

ukupni troškovi propulzijskog sustava s dva, tri i četiri vijka malo variraju (unutar 6%), pa kao najekonomičniji izlazi dvovijčani pogon.

pouzdanost propulzijskog sustava u Scenariju 1 pada s brojem vijaka i motora, odnosno s povećanjem broja linija u rednom sustavu. Vrijednosti za pouzdanost propulzijskog sustava uzimaju se iz istog broja sati koje preplave sva tri broda, a referentna vrijednost je 0,96 koja se uzima kao točka nakon koje se obavljaju zahvati održavanja sustava. Graničnu vrijednost pouzdanosti prvi postiže četverovijčani brod. Razlika numeričkih vrijednosti za pouzdanost propulzijskog sustava s dva, tri i četiri vijka je unutar 2 %;

uspoređujući rezultate i podatke dobivene kroz rad [2] i prikazane u Tablici 5 zaključuje se:

prema funkciji cilja  $F_1$  optimalan propulzijski sustav unutar sva tri obrađena doplova je propulzijski sustav dvovijčanog broda;

funkcija cilja  $F_2$  ima najmanju numeričku vrijednost kod dvovijčanog broda;

najmanju numeričku vrijednost funkcije cilja  $F_3$ , također kao i u dva predhodna modela, ima propulzijski sustav dvovijčanog broda.

Kako je  $F_3$  sprega ukupnih troškova patrolnog broda po nautičkim miljama kroz deset godina i pouzdanosti propulzijskog sustava dane u obliku njihova omjera za zaključiti je da se izbor optimalnog propulzijskog sustava može provesti prema ukupnim troškovima propulzijskog sustava po nautičkim miljama kroz deset godina odnosno funkcije cilja  $F_2$ , jer su numeričke vrijednosti za varijablu pouzdanost vrlo visoke tj. asimptotski teže jedinici tako da u njihovoj sprezi ne utječu bitno na rezultat.

Zato se kao najprimjereniji kriterij za odabir optimalnog propulzijskog sustava može definirati funkcijom cilja  $F_2$ .

### Scenarij 2

- iz Tablice 5 vidljivo je da kod paralelne konfiguracije propulzijskog sustava pouzdanost se asimptotski približava jedinici s porastom broja vijaka (motora). Numeričke vrijednosti pouzdanosti kod dvo-, tro- i četverovijčanog broda su vrlo visoke, preko 0,96, i razlika od minimalne do maksimalne vrijednosti je oko 4%. - pregledom rezultata može se zaključiti: - funkcija cilja  $F_1$  svoj maksimum ima kod četverovijčanog broda, - najmanju numeričku vrijednost funkcije cilja  $F_2$  ima dvovijčani brod, - funkcija cilja  $F_3$  svoj minimum ima kod dvovijčanog broda.

Iako je u ovom scenariju kao propulzijski sustav s najvećom pouzdanosti četverovijčani brod, njegov utjecaj u funkciji cilja  $F_3$  je zanemariv jer se numeričke vrijednosti za pouzdanost asimptotski približavaju jedinici.

Optimalni propulzijski sustav definira se prema funkciji cilja  $F_2$  koja predstavlja ukupne troškove propulzijskog sustava po nautičkoj milji kroz deset godina pa tako on predstavlja i najbolji kriterij za njegov odabir.

#### 4. Zaključak

Radi odabira optimalnog propulzijskog sustava patrolnog broda analiziran je niz varijabli i parametara kako bi se definirao najprimjereniji kriterij za taj odabir. Razmatrane su sljedeće varijable: nabavna cijena propulzijskog sustava, troškovi održavanja propulzijskog sustava, troškovi potrošnje goriva i ukupni desetogodišnji troškovi patrolnog broda po nautičkoj milji, te pouzdanost propulzijskog sustava. Parametri koji se koriste u radu su: doplovi (800 nm, 1200 nm i 1600 nm), brzina krstarenja  $v_k = 18$  čv i vršna brzina  $v_t = 30$  čv, te broj propulzora koji je (dva, tri ili četiri). Obzirom na pouzdanost i zadaću patrolnih brodova nametnula se potreba za definiranjem dva scenarija: jedan kada se traži da brod uvijek bude u stanju ostvarivati vršnu brzinu u zadanom vremenskom razdoblju na stazi patroliranja i drugi, kada dođe do kvara na jednoj ili više linija propulzijskog sustava, ali je brod i dalje u mogućnosti ostati na stazi patroliranja i ploviti brzinom krstarenja. Kriterij za odabir optimalnog propulzijskog sustava patrolnog broda definiran je razmatrajući tri funkcije cilja: - funkcija cilja  $F_1$  koja traži najveću pouzdanost propulzijskog sustava patrolnog broda, - funkcija cilja  $F_2$ , kada se traže minimalni investicijski i eksploatacijski troškovi po pređenim nautičkoim miljama i - funkcija cilja  $F_3$ , kada se traže minimalni investicijski i eksploatacijski troškovi po pređenim nautičkoim miljama i po pouzdanosti, te se kao kriterij odabira optimalnog propulzijskog sustava patrolnog broda preporuča kriterij definiran funkcijom cilja  $F_2$ . U radu [2] korišteni su dostupni podaci o troškovima održavanja koji značajno utječu na pouzdanost. Utjecaj troškova održavanja na pouzdanost može biti tema daljnjih istraživanja.

Popis oznaka:

$v_k$  – brzina broda u krstarenju, čv,

$v_t$  – vršna brzina, čv,

$D_P$  – doplov broda, nm,

$L_{oa}$  – duljina broda preko svega, m,

$L_{PP}$  – duljina broda između okomica, m,

$B_{WL}$  – širina broda na vodnoj liniji, m,

$H_O$  – visina broda na glavnom rebru, m,

$T_{WL}$  – gaz broda na vodnoj liniji, m,

$C_B$  – blok koeficijent,

$\Delta_N$  – normalna istisnina, t,

$P_{MCR}$  – ugrađena maksimalna trajna snaga svih motora, kW,

$R_k$  – ukupni otpor broda pri brzini krstarenja, N,

$R_t$  – ukupni otpor broda pri vršnoj brzini, N.

#### LITERATURA

- [1] D. Gugić, M. Šuljić: Izgradivi brodovi serije "SKLAD", X Simpozij: Teorija i praksa brod., Opatija 1992.
- [2] S. Jakovljević: Optimizacija propulzijskog sustava patrolnih brodova za Jadran, magistarski rad, FSB - Zagreb 2003.
- [3] D. Gugić: Optimizacija propelera Wageningen B-serije, interni materijal Brodarskog instituta, Zagreb
- [4] J. Lovrić: Osnove brodske terotehnologije, Sveučilište u Splitu – Pomorski fakultet, Dubrovnik 1989
- [5] J. Lovrić: Optimizacija osnivanja i korištenja broda primjenom analize pouzdanosti brodskih sustava, (doktorski rad) - Dubrovnik 1980, FSB - Zagreb