

# Ispitivanje značajki i utjecaj brodskog vijka na propulziju ribarskog broda<sup>1</sup>

## *Testing the Features and the Effect of Marine Propeller on the Propulsion of a Fishing Ship*

Vladimir Vetma

Pomorski fakultet u Splitu  
e-mail: vlado@vetma-konstrukcije.com

Zlatan Kulenović

Pomorski fakultet u Splitu  
e-mail: zlatan@pfst.hr

Radovan Antonić

Pomorski fakultet u Splitu  
e-mail: radovan.antoniac@pfst.hr

UDK 629.5.03:629.562

Prethodno priopćenje / Preliminary communication  
Rukopis primljen / Paper accepted: 3. 12. 2013.

### Sažetak

Pravilni odabir odnosa pogonski stroj - brodski vijak jedan je od temeljnih preduvjeta za pouzdano, sigurno i ekonomično korištenje brodom, ovisno o njegovoj namjeni. Pogreške u odabiru moguće su u fazama projektiranja, a prepoznaju se tek u fazama eksploatacije broda. Njihovo ispravljanje veoma je skupo, a ponekad i neizvedivo. Ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava pokazatelj je pravilnog odabira osnovnih dijelova porivnog sustava broda. On ovisi o mnogobrojnim čimbenicima, a jedan od najvažnijih je odgovarajući odabir brodskog vijka. U radu je izložen kratki pregled osnovnih karakteristika porivnih sustava malih brodova i utjecaj brodskog vijka na propulziju ribarskog broda. Prikazan je metodološki postupak odabira optimalnog brodskog vijka s konstantnim usponom pogonjenog brzohodnim dizelskim motorom. Na primjeru ribarskog broda potvrđena je ispravnost predloženog načina određivanja geometrijskih i hidrodinamičkih značajki vijka uz pomoć proračuna vijka korištenjem dijagramima serija Wageninškog bazena. Prikazani su rezultati ispitivanja i mjerenja geometrijskih i hidrodinamičkih značajki brodskog vijka sa svrhom provjere geometrije ugrađenog vijka. Korištena je Prop Scan tehnologija. Utvrđene su razlike u geometriji između vijka dobivenog proračunom i vijka ugrađenog na odabranom ribarskom brodu. Kao pokazatelji korišteni su stupnjevi iskoristivosti vijka koji ilustriraju važnost pravilno odabranog vijka unutar porivnog sustava ribarskog broda.

### KLJUČNE RIJEČI

ribarski brod  
dizelski motor  
brodski vijak  
uspon  
iskoristivost vijka

### Summary

*Choosing the right ratio between the main propulsion engine and the marine propeller is one of the basic requirements for the overall reliable, safe and economic use of the ship, depending on their use. Selection errors are possible in the designing phase, which become apparent only during the phases of a ship exploitation. Its correction is extremely costly and sometimes impossible to achieve. The overall level of the propulsion system efficiency is an indicator of appropriate selection of the basic parts of a ship propulsion system. It depends on numerous factors and one of the most important is the right choice of the marine propeller. This paper gives a short overview of the basic characteristics for small ship propulsion systems, and the effect of marine propellers on the propulsion of fishing ships. The methodological process for choosing an optimal marine propeller with constant pitch powered by a high speed diesel engine is shown. The example of a fishing ship justifies the use of the proposed manner for determining geometric and hydrodynamic features of propeller with the aid of propeller calculations using diagrams of the Wageningen propeller series. Testing and measuring results are shown for the geometric and hydrodynamic features of the marine propeller in order to verify the geometry of the installed propeller. Prop Scan technology was used. Differences were determined for geometry between propeller obtained by calculation and propeller installed on the chosen fishing ship. The levels of propeller efficiency were used as indicators that illustrate the importance of selecting the right propeller for the propulsion system of a fishing ship.*

### KEY WORDS

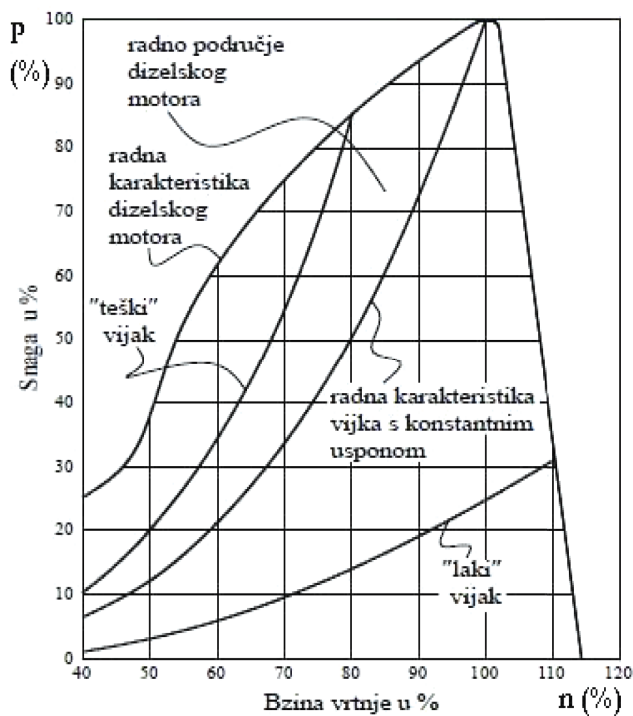
fishing ship  
diesel engine  
marine propeller  
pitch  
propeller efficiency

### UVOD / Introduction

Brodski vijak je most između broda i pogonskog stroja, pa mora biti odabran tako da se u normalnom radu krivulja apsorpcije vijka (snaga - brzina vrtnje) ne nađe u nepovoljnom radnom području pogonskog stroja, odnosno da se ne probije granična krivulja (radna karakteristika) pogonskog stroja. Pravilni odabir geometrijskih i hidrodinamičkih značajki brodskog vijka s konstantnim usponom ima veliku ulogu u tome. Brodski vijci

neodgovarajućih geometrijskih i hidrodinamičkih značajki uzrok su nastanka nepovoljnih radnih karakteristika lakog ili teškog vijka. Radne karakteristike lakog ili teškog vijka s konstantnim usponom unutar radnog područja brzohodnog dizelskog motora za pogon ribarskog broda, prikazane su krivuljama apsorpcije vijka (snaga - brzina vrtnje),  $P = f(n)$  na Slici 1. [12]. Radno područje dizelskog motora (Tablica 1.) ovisi o

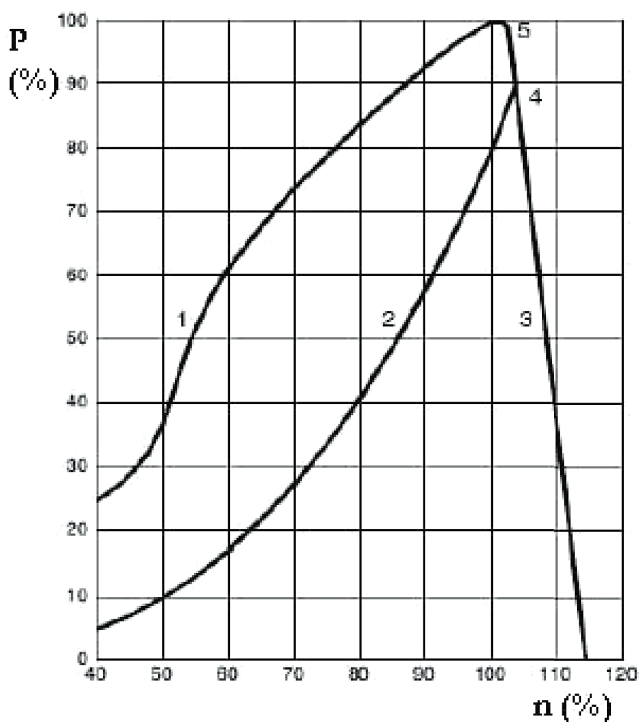
<sup>1</sup>Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta (Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju brodskih porivnih sustava), provedenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. The results presented in the paper have been derived from the scientific project "New technologies in Diagnosis and Control of Marine Propulsion Systems" supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.



Slika 1. Dijagram apsorpcije vijaka ( $P_B/n$ )%,  $P_B = f(n)$   
 Figure 1. Absorption diagram of the propeller ( $P_B/n$ )%,  $P_B = f(n)$

načinu upotrebe motora, tj. određuje ga stroj kojeg on pogoni, u ovom primjeru radno područje određuje vijak.

Brodski vijak treba osigurati rad pogonskog stroja u različitim uvjetima i režimima plovidbe, za različite otpore broda. Različiti otpori broda, koji se redovito javljaju kod malih brodova posebnih namjena, stvaraju najveći problem usklađivanja rada i odabira vijaka i pogonskog stroja. Primjerice, kod ribarskih brodova, osim otpora broda koji redovito nastaje kao posljedica gibanja broda određene geometrije u svom



Slika 2. Dijagram apsorpcije optimalnog vijaka ( $P_B/n$ )%,  $P_B = f(n)$   
 Figure 2. Absorption diagram of the optimal propeller ( $P_B/n$ )%,  $P_B = f(n)$

Tablica 1. Eksploatacijske radne karakteristike dizelskog motora  
 Table 1. Exploitation work characteristics of the diesel engine

EKSPLOATACIJSKE RADNE KARAKTERISTIKE DIZELSKOG MOTORA	
Efektivne snage dizelskog motora $P_e$	$P_e = P_B$
Nominalna snaga $P_n$ ili maksimalna trajna snaga $P_{MCR}$	$P_e = 100\% P_{MCR}$ $n = 100\% n_{nom}$
Eksploatacijska snaga $P_{eks}$	$P_e = (80 - 90)\% P_{MCR}$ $n = 100\% n_{nom}$
Ekonomična snaga $P_{ek}$	$P_e = (75 - 80)\% P_{MCR}$
Minimalna snaga $P_{min}$	$P_e =$ iz kubne parabole $n = 35\% n_{nom}$

prirodnom okruženju vode i zraka, uz sve ostale parametre koje je potrebno uzeti u obzir kod proračuna otpora broda [5], potrebno je ukupni otpor ribarskih brodova povećati za silu otpora u užetu teglja. Tako se dobije stvarni otpor ribarskih brodova. U skladu s tim stvarnim otporom potrebno je izvršiti pravilni odabir brodskog vijaka s pogonskim strojem.

Zbog toga je snaga pogonskog stroja  $P_B$  od 80 do 90% od maksimalne trajne snage  $P_{MCR}$  koju će vijak apsorbirati kod nominalne brzine vrtnje  $n_{nom}$ . Takav vijak je optimalan vijak. Radna karakteristika optimalnog vijaka s konstantnim usponom (krivulja 2) unutar radnog područja dizelskog motora za pogon ribarskog broda (prikazana dijagramom na Slici 2. [12]) predstavlja pravilo za odabir odnosa dizelski motor - brodski vijak, kako u fazama projektiranja, tako i u fazama eksploatacije broda.

U skladu s radnom karakteristikom (krivulja 2), vijak je geometrijski dimenzioniran i uređen tako da se može razviti eksploatacijska i maksimalna snaga dizelskog motora pri maksimalnoj brzini vrtnje. Dizelski motor u eksploataciji s  $80\% P_{MCR}$  opterećenja ima najpovoljniji efektivni stupanj iskoristivosti  $\eta_e$  ( $\eta_e = 0,35 - 0,45$ ) [12] i najpovoljniji specifični efektivni potrošak goriva  $b_e$ . Pokazatelji ove radne karakteristike za ribarski brod prema dijagramu na Slici 2. prikazani su u Tablici 2.

Odabir značajki optimalnog vijaka postiže se uz pomoć proračuna brodskog vijaka s konstantnim usponom korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama serija vijaka Wagenišskog bazena i to za radnu karakteristiku optimalnog vijaka prema dijagramu apsorpcije  $P_B/n$  (Slika 2.) za eksploatacijsko radno područje (opterećenje) dizelskog motora  $P_B = 80\% P_{MCR}$  (kW),  $n = 100\% n_{nom}$  (min<sup>-1</sup>). Rezultati proračuna su najpovoljnije geometrijske (promjer vijaka  $D$  i uspon vijaka  $P$ ) i hidrodinamičke značajke vijaka (stupanj iskoristivosti vijaka  $\eta_o$ ). Stupanj iskoristivosti vijaka  $\eta_o$  ima veliki utjecaj na ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_r$ .

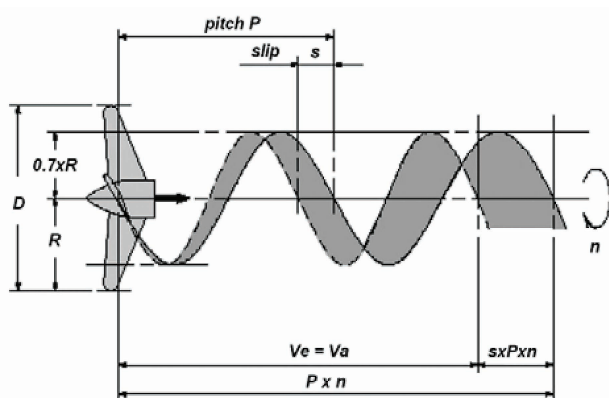
Ispitivanje geometrije brodskog vijaka s konstantnim usponom uz pomoć Prop Scan tehnologije temelji se na mjerenju

Tablica 2. Radna karakteristika optimalnog vijaka  
 Table 2. Optimal propeller work characteristics

Radna karakteristika vijaka unutar radnog područja dizelskog motora	Radna točka
POKUSNA PLOVIDBA novi brod	4 $P_B = 90\% P_{MCR}$ $n = (103 - 105)\% n_{nom}$
EKSPLOATACIJA za ribarski brod	2 $P_B = 80\% P_{MCR}$ $n = 100\% n_{nom}$
PORAST STVARNOG OTPORA BRODA	5 $P_B = 100\% P_{MCR}$ $n = 100\% n_{nom}$

uspona [13]. Izmjereni usponi, a time i skenirani presjek lica krila vijka na određenom radijusu  $r$  uspoređuje se s podlogama ispravnog vijka povoljnih geometrijskih i hidrodinamičkih značajki za predmetni brod i njegov pogonski stroj. Podloga ispravnog vijka je presjek lica krila vijka na određenom radijusu  $r$  s takvom geometrijom, promjerom  $D$  i usponom  $P$  za koji je potrebno optimizirati vijak. Osim sofisticiranih programa za proračun vijka koji su dio Prop Scan tehnologije, podloge ispravnog vijka mogu biti dobivene i metodološkim postupkom proračuna brodskog vijka s konstantnim usponom korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama serija vijaka Wageninškog bazena. Na ovaj način Prop Scan tehnologija omogućuje usporedbu značajki vijka dobivenog proračunom i ugrađenog na predmetni brod.

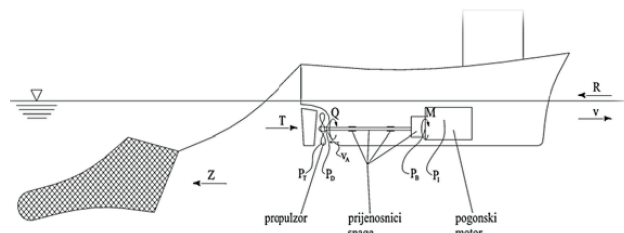
Osnovne geometrijske (promjer vijka  $D$  i uspon vijka  $P$ ) i hidrodinamičke značajke vijka (brzina napredovanja vijka  $v_e = v_a$ ) prikazane su na Slici 3. [2].



Slika 3. Osnovne geometrijske i hidrodinamičke značajke vijka  
Figure 3. Basic geometric and hydrodynamic propeller characteristics

### UTJECAJ BRODSKOG VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM NA PROPULZIJU RIBARSKOG BRODA /Effect of marine propeller with constant pitch on the propulsion of a fishing ship

Kao ocjena utjecaja brodskog vijka s konstantnim usponom na propulziju ribarskog broda služi ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_r$ . Kako je brodski vijak kao propulzor izravno vezan za dizelski motor, njegov pravilni odabir ima veliki utjecaj na propulziju ribarskog broda. U nastavku su dani glavni parametri potrebni za preliminarno određivanje ukupnog stupnja iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_r$ . Porivni sustav ribarskog broda prikazan je na Slici 4.



Slika 4. Porivni sustav ribarskog broda  
Figure 4. Propulsion system of a fishing ship

Ukupna snaga otpora (efektivna snaga)  $P_E$  je [12]:

$$P_E = (R + Z) \cdot v \text{ (kW)} \quad (1)$$

gdje je:

- $R$  - ukupni otpor ribarskog broda (kN),
- $Z$  - otpor u užetu teglja (mreže) (kN),
- $(R + Z)$  - stvarni otpor ribarskog broda (kN),
- $v$  - brzina broda (m/s).

Snaga poriva  $P_T$  je [12]:

$$P_T = T \cdot v_e \text{ (kW)} \quad (2)$$

gdje je:

- $T$  - sila poriva koju proizvodi vijak (kN),
- $v_e$  - brzina napredovanja vijka (m/s).

Snaga poriva  $P_T$  uvijek je veća od ukupne snage otpora  $P_E$ . Snaga otpora je snaga koja je potrebna za tegljenje broda bez propulzora (vijka). Zbog postojanja vijka, otpor broda se povećava pa snaga poriva mora svladati i taj otpor.

Smanjenje brzine dostrujavanja, pritjecanja vode vijku  $v_a$  mjera je otpora broda u mirnoj vodi. Čestice vode uz krmeni dio broda struje nekom brzinom, u istom smjeru u kojem se giba brod, tako da je brzina dostrujavanja vode vijku  $v_a$  manja od brzine broda  $v$ . Kada se vijak nalazi na krmi broda brzina napredovanja vijka  $v_e$  postaje brzinom dostrujavanja, pritjecanja vode vijku  $v_a$ . Koeficijent sustrujanja  $w$  je [4]:

$$w = 1 - \frac{v_a}{v} \quad (3)$$

Preliminarno za brodove s jednim vijkom [4]:

$$w \approx -0,05 + 0,50 \cdot C_B \quad (4)$$

gdje je:

- $C_B$  - koeficijent istisnine.

Koeficijent istisnine (deplasmana)  $C_B$  je [5]:

$$C_B = \frac{V}{L_{WL} \cdot B_{WL} \cdot T_{WL}} \quad (5)$$

gdje je:

- $V$  - istisnina (volumen) ( $m^3$ ),
- $L_{WL}$  - duljina broda na vodnoj liniji (m),
- $B_{WL}$  - širina broda na vodnoj liniji (m),
- $T_{WL}$  - gaz broda na vodnoj liniji (m).

Prema tome, brzina napredovanja vijka  $v_e$  je [7]:

$$v_e = v_a = v \cdot (1 - w) \text{ (m/s)} \quad (6)$$

Porast otpora broda zbog utjecaja rada vijka po krmi broda izražava se koeficijentom smanjenog poriva (upijanja)  $t$ . Rad vijka rezultira promjenom polja tlaka, ali i polja brzine na krmenom dijelu broda (ubrzanje vode oko trupa). Koeficijent smanjenog poriva (upijanja)  $t$  je [4]:

$$t = 1 - \frac{R + Z}{T} \quad (7)$$

Preliminarno za brodove s jednim vijkom [5]:

$$t = 0,60 \cdot (1 + 0,67 \cdot w) \cdot w \quad (8)$$

Ukupno dovedena snaga  $P_{dov}$  je [12]:

$$P_{dov} = B \cdot H_d \text{ (kW)} \quad (9)$$

gdje je:

- $B$  - potrošnja goriva u jedinici vremena (kg/s),
- $H_d$  - donja ogrijevna moć goriva (kJ/kg).

Indicirana snaga dizelskog motora  $P_i$  je [12];

$$P_i = P_{dov} \cdot \eta_i \text{ (kW)} \quad (10)$$

gdje je:

- $\eta_i$  - indicirani stupanj iskoristivosti dizelskog motora.

Kočena snaga dizelskog motora (efektivna snaga dizelskog motora) na prirubnici koljenastog vratila  $P_B$  je [12]:

$$P_B = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (\text{kW}) \quad (11)$$

gdje je:

$M$  - moment vrtnje mjeran na prirubnici koljenastog vratila dizelskog motora (kNm),  
 $n$  - brzina vrtnje koljenastog vratila dizelskog motora ( $\text{s}^{-1}$ ), ili

$$P_B = P_i \cdot \eta_m \quad (\text{kW}) \quad (12)$$

gdje je:

$\eta_m$  - mehanički stupanj iskoristivosti dizelskog motora.

Snaga predana vijku  $P_D$  manja je od snage  $P_B$  za iznos mehaničkih gubitaka u prijenosnicima snage, reduktoru brzine vrtnje (2 - 5 %) i ležajevima osovinskog voda (odrivni do 1 %, radijalni do 0,5 %). Razlika između  $P_D$  i  $P_B$  predstavlja gubitak snage u reduktoru, ležajevima osovinskog voda i krmene statve. Zbog toga se omjer  $P_D/P_B$  naziva iskoristivošću prijenosnika snage  $\eta_s$ .

Snaga predana vijku (vijkom apsorbirana snaga)  $P_D$  je [7]:

$$P_D = P_B \cdot \eta_s \quad (\text{kW}) \quad (13)$$

gdje je:

$\eta_s$  - stupanj iskoristivosti prijenosnika snage.

Stupanj iskoristivosti propulzije prema R. E. Froudeu  $\eta_D$  je [4]:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{(R+Z) \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot n} = \frac{T \cdot v_a}{2 \cdot \pi \cdot Q_0 \cdot n} \cdot \frac{(R+Z) \cdot v}{T \cdot v_a} \cdot \frac{Q_0}{Q} \quad (14)$$

gdje je:

$\eta_D$  - stupanj iskoristivosti propulzije,  
 $Q$  - moment vrtnje predan vijku (kNm),  
 $n$  - brzina vrtnje vijka ( $\text{s}^{-1}$ ),  
 $Q_0$  - moment vrtnje predan vijku u slobodnoj vožnji (kNm).

Stupanj iskoristivosti propulzije  $\eta_D$  je [4]:

$$\eta_D = \eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_R \quad (15)$$

Prema jednadžbi (14) stupanj iskoristivosti propulzije  $\eta_D$  neće biti jednak stupnju iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_0$  zbog utjecaja sustrujanja i upijanja.

Koeficijent utjecaja trupa  $\eta_H$  je [4]:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (16)$$

Koeficijent prijelaza  $\eta_R$  je [4]:

$$\eta_R = \frac{\eta_B}{\eta_0} \quad (17)$$

gdje je:

$\eta_B$  - stupanj iskoristivosti vijka za rad po krmu broda.

Preliminarno za jednovijčane brodove [4]:

$$\eta_R = 0,98 - 1 \cdot (1,05) \quad (18)$$

Stupanj iskoristivosti vijka za rad po krmu broda  $\eta_B$  je [4]:

$$\eta_B = \eta_0 \cdot \eta_{R'} \quad (19)$$

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} \quad (20)$$

Stupanj iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_0$  za  $\eta_R = 1$  iznosi:

$$\text{pa je tako:} \quad \eta_0 = \frac{P_T}{P_D}$$

$$T = T_0 \text{ za izraz (14).} \quad (21)$$

Ukupan stupanj iskoristivosti propulzije  $\eta_p$  je [5]:

$$\eta_p = \eta_s \cdot \eta_D \quad (22)$$

Ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_T$  je [12]:

$$\eta_T = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_s \cdot \eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_R \quad (23)$$

## METODOLOŠKI POSTUPAK PRORAČUNA BRODSKOG VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM UZ KORIŠTENJE DIJAGRAMA SERIJA WAGENINŠKOG BAZENA / *Methodological calculation procedure of marine propeller with constant pitch using diagrams of the Wageningen propeller series*

Metodološki postupak proračuna broskog vijka s konstantnim usponom korištenjem dijagrama serija, dan je za radnu karakteristiku optimalnog vijka prema dijagramu apsorpcije  $P_B/n$  (Slika 2.) za eksploatacijsko radno područje (opterećenje) dizelskog motora  $P_B = 80\% P_{MCR}$  (kW),  $n = 100\% n_{nom}$  ( $\text{min}^{-1}$ ), te za maksimalnu brzinu broda  $v_{broda}$  [8]. Time je osigurana potrebna rezerva snage za održavanje potrebne brzine broda u primjeru povećanja stvarnog otpora broda. Zbog samog metodološkog postupka proračuna vijka potrebno je dotaknuti se projektiranja vijka uz pomoć dijagrama serija.

### Projektiranje broskog vijka uz pomoć dijagrama serija Wageninškog bazena / *Design of marine propeller by diagrams of the Wageningen propeller series*

Projektiranje vijka uz pomoć dijagrama serija dano je za nominalno radno područje dizelskog motora  $P_B = 100\% P_{MCR}$  (kW),  $n = 100\% n_{nom}$  ( $\text{min}^{-1}$ ), te za maksimalnu brzinu broda  $v_{broda}$  [3, 4].

Projektiranje vijka izvodi se uz pomoć teorije cirkulacije i dijagrama serija. Optimalni promjer vijka  $D$  moguće je odrediti samo uz pomoć dijagrama serija, dok se ostale značajke vijka mogu odrediti uz pomoć teorije cirkulacije i dijagrama serija.

Ovim radom obuhvaćeno je projektiranje vijka uz pomoć dijagrama serija. Odabire se najpovoljniji vijak za njegovo radno opterećenje. Potrebno je odrediti optimalni omjer svih značajki koje određuju vijak, uz istovremeno zadovoljavanje svih postojećih ograničenja, tako da pri zadanoj brzini vrtnje vijak apsorbira određenu snagu i proizvodi poriv potreban da se brod kreće određenom brzinom.

Za proračun brodskih vijaka koriste se dijagrami serija Wageninškog bazena. Na temelju rezultata ispitivanja serije modela brodskih vijaka izrađeni su dijagrami koji međusobno povezuju geometrijske (promjer, broj krila, površina i oblik krila, uspon) i hidrodinamičke značajke vijka (poriv, moment, brzinu, napredovanje, stupanj iskoristivosti vijka). Dijagrami su nastali sistematskim mijenjanjem karakterističnih dimenzija vijka. Tablica 3. prikazuje vijke tipa B i njegove serije ( $B.Z.A_E/A_O$ ) za omjere uspona  $P/D = 0,5 - 1,4$ .

Za konstrukciju vijka najvažniji su  $B_p - \delta$  dijagrami vijka, jer se redovito postavljani zadatak kod projektiranja vijka sastoji u tome, da se uz zadanu brzinu vrtnje  $n$ , koju vijak dobiva, stavlja na raspolaganje neka snaga  $P_D$ , kojom brod treba postići neku određenu brzinu  $v$ . Dijagrami  $B_p - \delta$  su dijagrami vijaka u slobodnoj vožnji [4].

Uz pomoć poznate raspoložive snage  $P_D$  može se izračunati koeficijent snage  $B_p$ , koji određuje opterećenje vijka. Koeficijent snage - opterećenje vijka  $B_p$  određuje se jednadžbom [3]:

$$B_p = \frac{n \cdot \sqrt{P_D}}{v_a^{2.5}} \quad (24)$$

Na dijagramu  $B_p - \delta$  ucrtane su krivulje konstantne vrijednosti stupnja iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_o$ , kao i konstantne vrijednosti koeficijenta brzine  $\delta$  (recipročnog omjera napredovanja  $J$ ). Koeficijent brzine  $\delta$  određuje se jednadžbom [3]:

$$\delta = \frac{n \cdot D}{v_a} \quad (25)$$

U izraze za koeficijent snage  $B_p$  i koeficijent brzine  $\delta$  uvrštavaju se vrijednosti za:  $n$  - brzinu vrtnje vijka (u staroj mjeri  $\text{min}^{-1}$ ),  $P_D$  - snagu predanu vijku (u staroj mjeri HP),  $v_a$  - brzinu dostrujavanja vode vijku (u staroj mjeri čv), i  $D$  - promjer vijka (u staroj mjeri ft).

Dijagrami serija omogućuju projektiranje i proračun vijka mijenjanjem dviju promjenjivih veličina: promjera vijka  $D$  (m) ili brzine vrtnje vijka  $n$  ( $\text{min}^{-1}$ ), s ciljem postizanja optimalnog stupnja iskoristivosti vijka  $\eta_o$ . U nastavku rada prikazan je metodološki postupak proračuna brodskog vijka s konstantnim usponom određivanjem promjera vijka  $D$  korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama vijka.

### Proračun brodskog vijka s konstantnim usponom korištenjem $B_p - \delta$ dijagrama vijka / Calculation of marine propeller with constant pitch using $B_p - \delta$ propeller diagrams

Optimalni vijak treba zadovoljiti postavljeni zahtjev da uz oko 80 - 90% opterećenje dizelskog motora osigurava maksimalnu brzinu broda. Istu brzinu mora vijak osigurati i u primjeru povećanja otpora broda, uz pretpostavku da vijak apsorbira punu (nominalnu) snagu motora uz odgovarajuću brzinu vrtnje. Preduvjet za proračun i projektiranje brodskog vijka je poznavanje osnovnih podataka broda i pogonskog stroja.

U osnovne podatke broda važne za proračun vijka ubrajaju se: glavne dimenzije brodskog trupa i njihovi omjeri, koeficijenti trupa te brzina broda  $v$ . Glavne dimenzije brodskog trupa su: duljina broda  $L$  (m), širina broda  $B$  (m) i gaz broda  $T$  (m). Koeficijent istisnine  $C_b$  potrebno je odrediti iz jednadžbe (5).

U osnovne podatke pogonskog stroja (dizelski motor) važne za proračun vijka ubrajaju se: kočena snaga dizelskog motora  $P_B$  (kW) i brzina vrtnje dizelskog motora  $n$  ( $\text{min}^{-1}$ ).

Nakon što se prikupe svi osnovni podaci broda i pogonskog stroja potrebno je odrediti: snagu predanu vijku  $P_D$  i brzinu vrtnje vijka  $n$ , brzinu napredovanja vijka  $v_e = v_a$ , broj krila vijka  $Z$ , omjer površina vijka  $A_E/A_O$  i oblik krila.

Snagu predanu vijku  $P_D$  moguće je odrediti iz: ukupne snage otpora  $P_E$  ili kočene snage dizelskog motora  $P_B$ .

Pošto je ukupnu snagu otpora  $P_E$  potrebno odrediti

ispitivanjem modela broda u bazenu poštujući zakon sličnosti ili uz pomoć određenih proračuna ukupnog otpora broda na probnoj vožnji, snagu predanu vijku  $P_D$  moguće je odrediti prema poznatoj kočenoj snazi dizelskog motora  $P_B$ , koristeći se jednadžbom (13).

Značajke vijka razmatrane u dijagramima serija vijaka Wageninškog bazena važe za slatku vodu, pa prema tome treba u jednadžbu (13) uvrstiti snagu za isti uvjet [8]:

$$P_D = \frac{P_B}{1.025} \text{ (kW)} \quad (26)$$

Brzinu vrtnje vijka potrebno je odrediti iz prijenosnog omjera reduktora  $i$  [8]:

$$i = \frac{n_{motora}}{n_{vijka}} \quad (27)$$

Brzina napredovanja vijka određuje se iz jednadžbe (6). Prethodno je potrebno iz izraza (4) odrediti koeficijent sustrujanja  $w$ , te iz izraza (8) koeficijent smanjenog poriva  $t$ .

Broj krila vijka odabire se s obzirom na utjecaj broja krila na dimenzije i na stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$ , što je moguće zaključiti iz dijagrama serija vijaka u slobodnoj vožnji. Najčešća je upotreba vijaka s tri ili četiri krila. S gledišta vibracija, ali i za jako opterećene i brze vijke radije se primjenjuju četverokrlni vijci.

Omjer površina vijka, također se odabire s obzirom na utjecaj površina vijka na dimenzije i na stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$ . Stupanj iskoristivosti vijka smanjuje se s povećanjem omjera površina vijka  $A_E/A_O$  zbog većeg trenja površina. Kako bi stupanj iskoristivosti vijka bio povoljniji, treba nastojati da omjer površina vijka bude što je moguće manji, vodeći pri tome računa i o ostalim uvjetima s obzirom na taj omjer. Ipak, izbor veličine omjera površina vijka  $A_E/A_O$  ovisi o općem kavitacijskom uvjetu. Kellerova jednadžba kojom se određuje minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$  prema kriteriju kavitacije je [7]:

$$\frac{A_E}{A_O} = \frac{(1.3 + 0.3 \cdot Z) \cdot T}{(p_o - p_v) \cdot D^2} + k \quad (28)$$

gdje je:

$T$  - sila poriva (kN),  $Z$  - broj krila vijka,  $p_o - p_v$  - razlika statičkog tlaka i tlaka vodene pare (Pa),

$D$  - promjer vijka (m),  $k$  - konstanta ( $k = 0 - 0,2$ , usvajamo  $k = 0,2$ ).

Kako je omjer površina vijka  $A_E/A_O$  određen prema kriteriju kavitacije, potrebno je u dijagramima serija vijka za izračunatu vrijednost  $A_E/A_O$  odrediti najbližu gornju i donju vrijednost omjera  $A_E/A_O$ , kako bi se linearnom interpolacijom odredile najvažnije značajke vijka.

Sila poriva može se odrediti uz pomoć jednadžbi (7) i (14), pa

Tablica 3. Vijci tipa B, serije B.Z. $A_E/A_O$   
Table 3. Propellers type B, series B.Z. $A_E/A_O$

Z	$A_E/A_O$													
2	0,30													
3		0,35			0,50			0,65			0,80			
4			0,40			0,55			0,70			0,85	1,00	
5				0,45			0,60			0,75				1,05
6					0,50			0,65			0,80			
7						0,55			0,70			0,85		

za poznatu snagu predanu vijku  $P_D$ , sila poriva  $T$  [8]:

$$T = \frac{P_D \cdot \eta_D}{(1 - t) \cdot v} \text{ (kN)} \cdot \quad (29)$$

Razlika statičkog tlaka i tlaka vodene pare  $p_o - p_v$  je [7]:

$$p_o - p_v = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h - p_v \text{ (Pa)} \quad (30)$$

gdje je:

$p_o$  - statički tlak iznad osi vijčane osovine na velikoj udaljenosti ispred vijka

(suma atmosferskog i hidrostatskog tlaka) (Pa),

$p_v$  - tlak vodene pare (isparavanja) kod odnosne temperature (Pa)

iz  $T$ -s dijagrama za vodenu paru npr.  $p_v(15^\circ\text{C}) = 0.0175$  bar,

$p_{atm}$  - atmosferski tlak (Pa)  $p_{atm} = 98\,100$  Pa,  $\rho$  - gustoća slatke vode ( $\text{kg/m}^3$ )  $\rho = 1025$   $\text{kg/m}^3$ ,

$h$  - ukupna visina statičkog tlaka iznad osi vijčane osovine (uronjenost)  $h = D$  (m) [4]. (31)

Dijagrami serija vijaka Wageninškog bazena nastali su ispitivanjem u slatkoj vodi, poštujući kriterije kavitacije. Općenito zbog kriterija kavitacije, ali i ostalih zahtjeva minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$  je od 0,35 - 0,40.

Promjer vijka  $D$  ima određena ograničenja s obzirom na uronjenost vijka. Kako su ribarski brodovi pod takvim režimima plovidbe u kojima je krma dosta uronjena, može se uzeti da je preliminarno za ribarske brodove [8]:

$$D_{max} = (0,7 - 0,8) \cdot T_{max} \text{ (m)}$$

gdje je:

$$T_{max} - \text{maksimalni gaz broda (m)} \quad (32)$$

Oblik krila djeluje na stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$ , ali od veće je važnosti utjecaj oblika na kavitacijske karakteristike vijka. Zbog ovoga uvjeta su i nastali vijci tipa B, serija B.4.40, B.4.55, ... sa širim krilima na vršcima, te s presjecima u obliku kružnih segmenata na vanjskim dijelovima krila vijka (od 0,7R).

Uz pomoć dijagrama serija vijaka Wageninškog bazena potrebno je odrediti najpovoljniji promjer vijka  $D$ . Najpovoljniji, optimalni promjer  $D$  treba imati maksimalni stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$ , pritom poštujući kriterije kavitacije. Slijedi postupak proračuna najoptimalnijeg vijka korištenjem  $B_p - \delta$  dijagramom vijka [4, str. 240]:

1. Izračuna se  $B_p$  prema jednadžbi (24).
2. Za izračunate vrijednosti  $B_p$  odrediti najpovoljniji  $\eta_o$  iz dijagrama  $B_p - \delta$ , za različite omjere  $A_E/A_O$  (donja i gornja vrijednost  $A_E/A_O$ ). Nakon toga odrediti vrijednosti  $P/D$  i  $\delta$ . Odaberi onu vrijednost  $A_E/A_O$  koja ima maksimalni stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$ .
3. Vrijednosti za  $\delta$  moraju se umanjiti za 4 do 6% za jednovijčane brodove [4, 8] da u nejednolikom polju sustrujanja, kao i kod smanjenja opterećenja vijka  $B_p$  stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_o$  ne bi naglo opao. Kako projektirani vijak treba odgovarati postavljenom uvjetu proračuna vijka za eksploatacijsko radno područje dizelskog motora  $P_B = 80\% P_{MCR}$ , konstanta koeficijenta brzine  $\delta$  će se smanjiti nešto više nego je to uobičajeno. U ovom primjeru  $\delta$  se umanjuje za dodatna 2%. Razlozi su u određivanju optimalnog promjera vijka  $D$ .

Promjer vijka  $D$  određuje se iz jednadžbe (25) za ispravljenu, reduciranu vrijednost  $\delta$  [4]:

$$D = \frac{\delta \cdot v_a}{n} \quad (33)$$

gdje je:

$$\delta = (0,92 - 0,94) \cdot \delta - \text{za jednovijčane brodove.} \quad (34)$$

Očitati iz  $B_p - \delta$  dijagrama nove vrijednosti  $\eta_o$  i  $P/D$  za ispravljenu vrijednost  $\delta$ .

4. Ponoviti proračun za  $A_E/A_O$  za ispravljenu vrijednost promjera  $D$ .

5. Interpolacijom očitanih vrijednosti prema 3., za izračunati potrebni omjer  $A_E/A_O$  prema 4., može se, ako je potrebno, dobiti točnije rezultate za  $D$ ,  $P/D$  i  $\eta_o$ , korištenjem linearne interpolacije prema jednadžbi pravca. Dobiveni rezultati nakon interpolacije su optimalne vrijednosti.

Napomena: Iz dijagrama  $B_p - \delta$  očitani omjer uspona  $P_O/D$  (stara oznaka  $H_O/D$ ,  $H_O$  - vrh krila) je za uspon  $P_O$  na vrhu krila. Tome odgovarajući vijak konstantnog uspona  $P$  dobiva se smanjnjem  $P_O$  za 1% [4, 8].

6. Ponoviti proračun za  $A_E/A_O$  za optimalnu vrijednost promjera  $D$ . Projektiranje vijka ribarskog broda predstavlja kompromis između dva ekstremna primjera: slobodne vožnje maksimalnom brzinom te tegljenja i kočarenja nekom određenom nižom brzinom. Za kočarice s jednostepenim reduktorom preporuča se, da se vijak proračuna za maksimalnu brzinu broda u slobodnoj vožnji s brzinom vrtnje za 5% većom i sa snagom za 10% manjom od maksimalne vrijednosti koje daje proizvođač dizelskih motora (točka 4. na radnoj karakteristici optimalnog vijka prema dijagramu apsorpcije  $P_B/n$  prikazanom na Slici 2.). Time se osigurava dobro djelovanje vijka u svim uvjetima rada, bez opasnosti od preopterećenja motora.

## ISPITIVANJE GEOMETRIJE BRODSKOG VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM UZ POMOĆ PROP SCAN TEHNOLOGIJE / *Testing the geometry of marine propeller with constant pitch using Prop Scan technology*

Prop Scan je sofisticirana i precizna tehnologija za ispitivanje vijaka s konstantnim usponom [6]. Korištenjem Prop Scan tehnologije omogućen je popravak, modifikacija i optimizacija vijaka svih vrsta brodova. Tehnologija omogućava ispitivanje kompletne geometrije vijka, dijagnosticiranje njegovih nepravilnosti, njihovo uklanjanje i modifikiranje s ciljem postizanja što povoljnijih hidrodinamičkih odrednica vijka. Često se radi i o vijcima koji su tek izašli iz tvornice čije geometrijske značajke ne odgovaraju traženima. Vijci se proizvode serijski prema ISO 484 klasama točnosti, ali imaju svoje „porodiljne“ pogreške u geometriji. Najčešće se radi o pogrešnom usponu  $P$ .

Optimiziranje vijka Prop Scan tehnologijom temelji se na korekciji uspona u skladu s najvišim međunarodnim standardom za brodogradnju i brodske vijke ISO 484 (ISO 484/1 i ISO 484/2) s tolerancijama točnosti izrade vijaka iz 1981 godine<sup>1</sup>.

Prop Scan sustav za ispitivanje i dijagnostiku vijaka prikazan

<sup>1</sup>Standard ISO 484 obuhvaća postupak izrade (odljevcu, završna obrada), kao i specifikaciju opreme koja se može koristiti za izradu vijaka. ISO 484/2 odnosi se na vijke promjera od 800 mm do 2500 mm, dok se ISO 484/1 odnosi na vijke promjera većeg od 2500 mm [13].

je na Slici 5. Sustav se sastoji od radnog stola s postoljem za vijak, te od krana s mjernom šipkom i senzorom. Mjerna šipka sa senzorom prelazi preko lica krila vijka u smjeru od ulaznog prema izlaznom bridu po označenim radijusima. Senzori prikupljaju podatke s lica krila za svaki stupanj okretaja vijka na postolju radnog stola i te podatke šalju u računalo.

Drugi dio Prop Scan sustava sastoji se od računala opremljenog programima koji obrađuju primljene podatke. Rezultati mjerenja prikazuju se na ekranu računala. Mjerenje se obavlja okretanjem vijka na postolju za 360°, što odgovara vrijednosti jednog uspona. Radijusi se ocrtavaju na način da se na mjernoj šipki prethodno postavi šiljak za označavanje radijusa zakretanjem vijka na postolju radnoga stola. Najčešće označeni radijusi su:  $r = 0,3 \cdot R$ ,  $r = 0,4 \cdot R$ ,  $r = 0,5 \cdot R$ ,  $r = 0,6 \cdot R$ ,  $r = 0,7 \cdot R$ ,  $r = 0,8 \cdot R$ ,  $r = 0,9 \cdot R$  i  $r = 0,95 \cdot R$  (vrh krila).

Rezultati mjerenja prikazuju se kao izvještaji u obliku linearnih i stupčanih dijagrama. Dobiveni rezultati su izmjerene vrijednosti uspona za jedan puni okretaj vijka (360°) na određenom radijusu. Računalo registrira i pohranjuje izmjerene vrijednosti. S obzirom na toliki broj mjernih mjesta na tom radijusu, oblikuje se i sam presjek lica krila s oblikom i izgledom površine lica. Mjerenjem vijka za svaki stupanj okretaja možemo dobiti vrijednosti o lokalnom usponu, usponu presjeka, usponu krila i usponu vijka. To omogućuje daljnja poboljšanja standarda ISO 484 [13].

### PRORAČUN I ISPITIVANJE BRODSKOG VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM RIBARSKOG BRODA "MAJKA MARIJA" / Calculation and testing of marine propeller with constant pitch of a "Mother Mary" fishing ship

Cilj istraživanja koje je provedeno na nekoliko ribarskih brodova na području Šibenika i Tribunja je utvrditi utjecaj broskog vijka s konstantnim usponom na propulziju ribarskog broda. Karakterističan primjer za to je ribarski brod "Majka Marija" - Šibenik, vlasnika Fredija Popova iz Tribunja.



Slika 5. Prop Scan sustav za ispitivanje vijka [6]  
Figure 5. Prop Scan system for testing propellers [6]

Radnje primijenjene u navedenom istraživanju su:

- proračun broskog vijka s konstantnim usponom korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama vijka,
- ispitivanje geometrije broskog vijka s konstantnim usponom uz pomoć Prop Scan tehnologije i
- usporedba najvažnijih značajki vijka nakon proračuna i ispitivanja broskog vijka.

### Proračun broskog vijka s konstantnim usponom korištenjem $B_p - \delta$ dijagrama vijka / Calculation of marine propeller with constant pitch using $B_p - \delta$ propeller diagrams

Osnovni podaci ribarskog broda "Majka Marija" su [9]:

$L_{OA} = L = 18,34$  m - duljina preko svega  
 $L_{pp} = 14,40$  m - duljina između okomica  
 $B = 4,60$  m - širina  
 $B_{max} = 4,72$  m - širina maksimalna  
 $H = 2,00$  m - visina  
 $T = 1,60$  m - gaz  
 $T_k = 2,50$  m - gaz krme  
 $T_p = 1,80$  m - gaz prove  
 $T_{max} = 1,85$  m - gaz maksimalni  
Istisnina (težina)  $G = 50$  t  
Istisnina (volumen)  $V = 48,73$  m<sup>3</sup>  
Materijal gradnje ribarskog broda je drvo.

Brzina ribarskog broda:  $v = 12$  čv (6,173 m/s). Ribarski brod je jednovijčani. Namjena broda je ulov ribe kočarenjem i prijevoz putnika u jednodnevnim ljetnim izletima.

Koeficijent istisnine  $C_b$  određuje se prema jednadžbi (5), gdje usvajamo za:

$L_{WL} = L_{pp} + 1\% = 14,544$  m,  $B_{WL} = B = 4,60$  m,  $T_{WL} = T = 1,60$  m, pa je  $C_b = 0,455$ .

Pogonski stroj ribarskog broda je brzohodni dizelski motor tipa WM 1312 H. Radi se o V motoru s 12 cilindara. Osnovni podaci brzohodnog dizelskog motora tipa WM 1312 H su [10]:

$P_b = 242,71$  kW (330 HP),  $n_{motora} = 1800$  min<sup>-1</sup> i prijenosni omjer reduktora:  $i = 5 : 1$ .

Snagu predanu vijku  $P_D$  za ribarski brod moguće je odrediti iz (13) i (26), za  $\eta_s = 0,97$ , pa je  $P_D = 229,69$  kW (312,29 HP).

Brzina vrtnje vijka može se odrediti iz (27):  $n_{vijka} = 360$  min<sup>-1</sup>.

Koeficijent sustrujanja  $w$  prema jednadžbi (4) je:  $w = 0,177$ , dok je koeficijent smanjenog poriva  $t$  prema jednadžbi (8):  $t = 0,119$ . Iz dobivenih vrijednosti za  $w$ ,  $t$ , pa i  $CB$  može se zaključiti kako je ribarski brod vitkog oblika.

Brzina napredovanja vijka  $v_e = v_a$  (6) je:  $v_e = v_a = 9,876$  čv  $\approx$  10 čv (5,144 m/s).

Za proračun broskog vijka ribarskog broda odabire se četverokrlni vijak. Razlog tome je što više smanjiti vibracije na krmenom dijelu ribarskog broda, pogotovo pri velikim brzinama vrtnje motora i samim time osigurati što mirniji rad porivnog sustava ribarskog broda. Usvojeno je:  $Z = 4$ .

Sada je potrebno odrediti minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$  koristeći jednadžbu (28). Prethodno se mora izračunati sila poriva  $T$  uz pomoć jednadžbe (29).

Kako je objašnjeno u nastavku, odabire se najpovoljniji  $\eta_0 = 0,652$ . Iz izraza (16) izračuna se  $\eta_H = 1,07$ , te uz pretpostavljeni  $\eta_R = 1,025$ , može se preliminarno uz pomoć jednadžbe (15) odrediti da je  $\eta_D = 0,715$ . Navedene vrijednosti za  $\eta_H$  i  $\eta_R$  ukazuju na povoljan utjecaj trupa, krme na rad vijka.

Prema tome sila poriva  $T$  je:  $T = 30,198$  kN.

Razliku statičkog tlaka i tlaka vodene pare  $p_o - p_v$  odrediti iz jednadžbe (30) za vrijednosti slatke vode pri  $t = 15^\circ\text{C}$ . Tada je za:

$p_{atm} = 98\,100$  Pa,  $\rho = 1025$  kg/m<sup>3</sup>,  $h = D$ , gdje je prema (32):  
 $D_{max} \approx 1,40$  m,

$p_v(15^\circ\text{C}) = 0,0175$  bar =  $1\,750$  Pa,

pa je  $p_o - p_v = 110\,346,908$  Pa =  $110,347$  kPa.

Sada se može odrediti minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$ :  $A_E/A_O = 0,549$ .

S obzirom na najpovoljniji oblik krila (Poglavlje 3.2.) odabran je brodski vijak s konstantnim usponom tipa B Wageninškog bazena. Slijedi proračun broskog vijaka s konstantnim usponom korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama vijaka [4, str. 240]:

1. Koeficijent snage  $B_p$  prema (24) je:  $B_p = 20,117$ .
2. Za izračunati  $B_p = 20,117$ , odabire se najpovoljniji  $\eta_0$  iz dijagrama  $B_p - \delta$  za vijke tipa B serije 4 za različite omjere  $A_E/A_O$ . Tablica 4. prikazuje rezultate iz dijagrama  $B_p - \delta$  za različite omjere  $A_E/A_O$ , odnosno za donju i gornju vrijednost od izračunate  $A_E/A_O = 0,5491$ . Najpovoljniji  $\eta_0$  je  $\eta_0 = 0,652$  prema dijagramu  $B_p - \delta$  za vijke tipa B, serije B.4.40 [4, str. 240].

Tablica 4. Rezultati iz dijagrama za  $A_E/A_O = 0,40$  i  $0,55$   
Table 4. Results from the diagram for  $A_E/A_O = 0,40$  i  $0,55$

$A_E/A_O$	0,40	0,55
$n$ (min <sup>-1</sup> )	360	360
$B_p$	20,117	20,117
$\delta$	181	174
$P_o/D$	0,787	0,85
$\eta_0$	0,652	0,617

Tablica 5. Rezultati iz dijagrama za  $A_E/A_O = 0,40$  i  $0,55$  i ispravljeni  $\delta$

Table 5. Results from the diagram for  $A_E/A_O = 0,40$  i  $0,55$  and correction  $\delta$

$A_E/A_O$	0,40	0,55
$n$ (min <sup>-1</sup> )	360	360
$B_p$	20,117	20,117
$\delta = 0,94 \cdot \delta$	170,14	163,56
$D$ (ft)	4,726	4,543
$D$ (m)	1,440	1,385
$P_o/D$	0,91	0,97
$P/D$	0,90	0,96
$\eta_0$	0,64	0,613

3. Promjer vijka  $D$  određuje se iz jednadžbe (33) za ispravljenu vrijednost  $\delta$ . Uzima se da je  $\delta = 0,94 \cdot \delta$ . Omjer uspona  $P/D$  i stupanj iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_0$  očitaju se iz  $B_p - \delta$  dijagrama za ispravljenu vrijednost  $\delta = 0,94 \cdot \delta$ . Tablica 5. prikazuje rezultate za ispravljenu vrijednost  $\delta$ .

4. Provjera proračuna za  $A_E/A_O$  za ispravljenu vrijednost promjera  $D$ . Postupak proračuna isti je kao i u Poglavlju 3.2.. Prema Tablici 5. maksimalna vrijednost za  $\eta_0 = 0,64$ , pa je prema tome:  
 $\eta_D = 0,702$ ,  $T = 29,649$  kN,  
 $D = 1,440$  m, a minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$  je:  $A_E/A_O = 0,524$ .

5. Interpolacijom rezultata iz Tablice 5. za vrijednost  $A_E/A_O = 0,524$  prema jednadžbi pravca, određene su sljedeće vrijednosti:  
- optimalni promjer  $D = 1,395$  m,  
- optimalni omjer uspona  $P/D = 0,94$ , i  
- optimalni stupanj iskoristivosti vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_0 = 0,62$ .

6. Provjera proračuna za  $A_E/A_O$  za vrijednost optimalnog promjera  $D$ .  
Za optimalni promjer  $D = 1,395$  m, te ako je  $\eta_D = 0,68$ , a  $T = 28,72$  kN, minimalno dopušteni omjer površina vijka  $A_E/A_O$  je:  $A_E/A_O = 0,534$ .

Proračunom dobiveni optimalni vijak s konstantnim usponom za ribarski brod "Majka Marija" trebao bi imati sljedeće optimalne značajke:  $D = 1395$  mm,  $P/D = 0,94$ ,  $\eta_0 = 0,62$ .

S obzirom na vrijednosti  $A_E/A_O = 0,534$  i  $Z = 4$  prema dijagramima serija vijaka tipa B Wageninškog bazena najbliža serija vijka s konstantnim usponom za promatrani ribarski brod je B 4.55 [4, str. 240].

Kontrola rezultata može se približno provjeriti i upotrebom dijagrama prikazanog na Slici 6. [12]. Dijagram služi za preliminarno određivanje najvažnijih geometrijskih i hidrodinamičkih značajki vijka s konstantnim usponom s obzirom na glavne parametre broda i pogonskog stroja suvremenih ribarskih brodova. Pošto je predmetni dijagram oblikovan za  $v_a = 10$  čv, može se izvršiti preliminarna kontrola rezultata za uvjet  $v_a = 10$  čv. Ako se iz izraza (14) odredi sila poriva u slobodnoj vožnji  $T_o$  za  $v_a = 10$  čv:

$$T = T_o = \frac{P_D \cdot \eta_0}{v_a} = 27.684 \text{ kN},$$

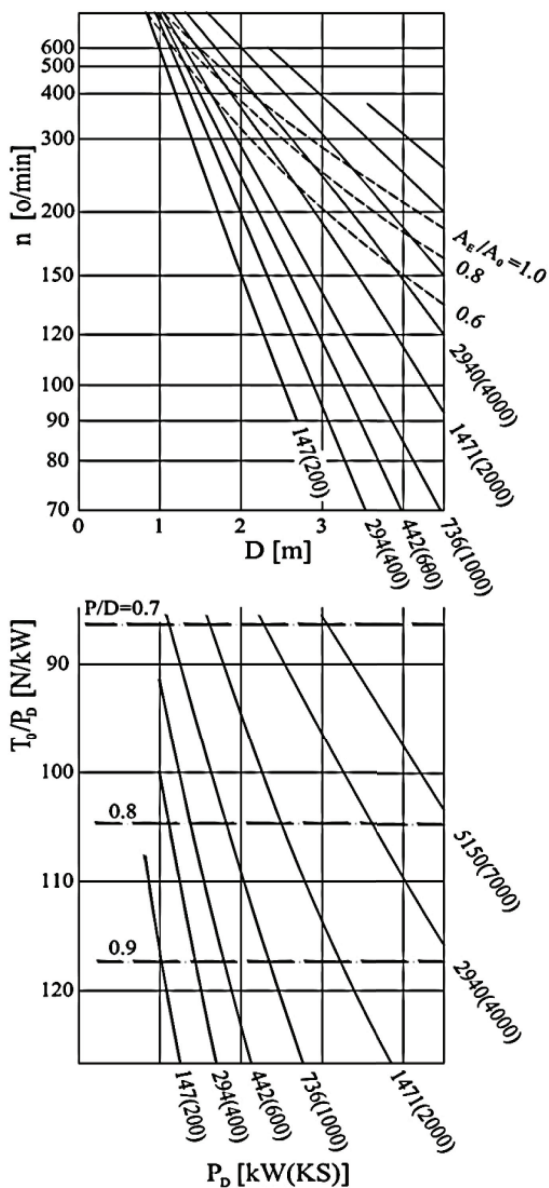
tada je:

$$\frac{T_o}{P_D} = \frac{27\,684}{229.69} = 120.53 \text{ N/kW}.$$




Rezultati i očitane karakteristike iz dijagrama prikazanog na Slici 6. su približne, ali pregledno ilustriraju pravilan odabir odnosa dizelski motor - brodski vijak za ribarski brod "Majka Marija".

Populzor ribarskog broda je brodski vijak s konstantnim usponom talijanskog proizvođača ELICHE RADICE. Oznaka na glavini vijka je ELICHE RADICE B6. Radi se o četverokrillnom vijku tipa B6 [11], posebno prilagođenom za ribarske brodove, sljedećih tvorničkih značajki (Slika 7.):





Slika 6. Dijagram za preliminarno određivanje najvažnijih značajki vijaka s konstantnim usponom kod  $v_0 = 10$  čv  
 Figure 6. Diagram for the preliminary determination of the most important features of the propeller with constant pitch in  $v_0 = 10$  kts

				
Modello Type	E12	E13	B6	B7
AS / AD Fa / F	 0.426	 0.515	 0.568	 0.687
P/D Max	0.85	0.85	0.9	0.9
Classe Class	ISO 2°	ISO 2°	ISO 2°	ISO 2°
Ø Max	2.5 MT	2.5 MT	2.5 MT	2.5 MT
LEGA Alloy	OTMAN	OTMAN	OTMAN	OTMAN

Slika 7. Tvorničke značajke vijaka ELICHE RADICE za ribarske brodove [11]

Figure 7. Factory features of the ELICHE RADICE propellers for the fishing ships [11]

$D = 1400$  mm,  $P/D_{max} = 0,9$ ,  $A_E/A_0 = 0,568$ .

Tvorničke značajke vijka B6 približno odgovaraju onima dobivenim proračunom. Materijal iz kojega je izrađen vijak je legura bronce. Klasa točnosti izrade vijaka je 2 prema ISO 484/2 standardu.

### Ispitivanje geometrije brodskog vijka ELICHE RADICE B6 uz pomoć Prop Scan tehnologije / Testing the geometry of ELICHE RADICE B6 marine propeller using Prop Scan technology

Provjera ispravnosti geometrije brodskog vijka B6 ugrađenog na ribarskom brodu "Majka Marija" izvršena je uz pomoć Prop Scan tehnologije [13].

Na Slici 8. prikazan je postupak mjerenja vijka tipa B6 Prop Scan tehnologijom. Prije ispitivanja na vijku je izvršena mala korekcija promjera za 20 mm, pa je  $D = 1380$  mm. Razlog su oštećenja koje je vijak imao na vršcima presjeka, profila krila.

Na kraju ispitivanja i mjerenja vijka B6, stupčanim dijagramom na Slici 9. prikazano je stanje vijka. Radi se o dijagramu kojim su pregledno obuhvaćene:

- srednje vrijednosti uspona presjeka za 1, 2, 3 i 4 krilo na svim radiusima,
- srednje vrijednosti uspona krila 1, 2, 3, i 4,
- srednja vrijednost uspona vijka

i njihova odstupanja od optimalnih vrijednosti, koje su unutar dopuštenih tolerancija za klasu točnosti izrade vijka prema međunarodnom standardu ISO 484/2. Dopuštene tolerancije za određenu ISO klasu točnosti vijka, prikazane su žutim isprekidanim pravokutnicima, područje tolerancije (tolerance band) [13].

Geometrijske značajke vijka B6 ribarskog broda "Majka Marija" dobivene mjerenjem Prop Scan tehnologijom su:

$D = 1380$  mm i  $P/D = 0,717$ .

Najvažnija geometrijska značajka vijka ELICHE RADICE B6 nakon ispitivanja, prikazana stupčanim dijagramom na Slici 9. odnosi se na srednju vrijednost uspona vijka  $P$ . S obzirom na izmjerenu vrijednost  $P = 989,85$  mm utvrđeno je da su geometrijske značajke vijka B6 ugrađenog na ribarskom brodu "Majka Marija" različite od geometrijskih značajki dobivenih proračunom, odnosno zadanih tvornicom. Za daljnju analizu poslužit će stupnjevi iskoristivosti navedenih vijaka  $\eta_p$ .

### Usporedba najvažnijih značajki vijka nakon proračuna i ispitivanja brodskog vijka / Comparison of the most important propeller characteristics after calculation and testing marine propeller

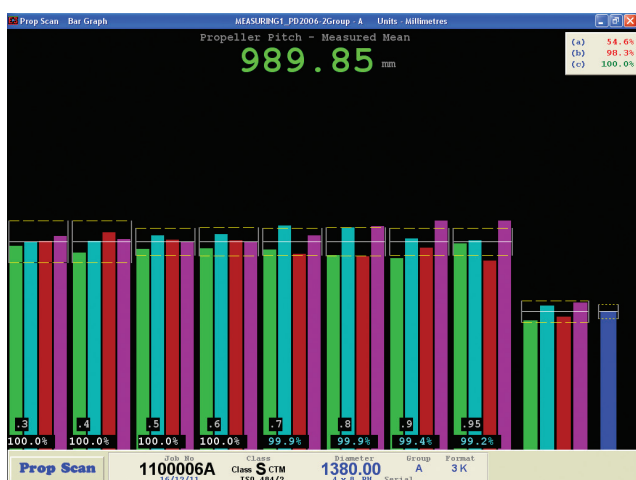
Najvažnije geometrijske i hidrodinamičke značajke vijka ribarskog broda "Majka Marija" dane su u Tablici 6. za radnu karakteristiku optimalnog vijka prema dijagramu apsorpcij  $P_B/n$  (Slika 2.) za eksploatacijsko radno područje dizelskog motora  $P_B = 80\% P_{MCR}$  (kW),  $n = 100\% n_{nom}$  ( $\text{min}^{-1}$ ) i  $BP = 20,117$  i za maksimalnu brzinu broda  $v_{broda}$  u slobodnoj vožnji. [8].

Za usporedbu i analizu geometrijskih i hidrodinamičkih značajki vijka korišten je  $B_p - \delta$  dijagram vijaka tipa B, serije B.4.55 [4, str. 240], jer su rezultati proračuna vijka iz Poglavlja 5.1. najbliži značajkama navedene serije. U Tablici 6. prikazana je usporedba značajki vijka dobivenog proračunom, vijka serije B.4.55, vijka ELICHE RADICE B6 s tvorničkim značajkama i vijka ELICHE RADICE B6 ugrađenog na ribarskom brodu "Majka Marija".



Slika 8. Postupak mjerenja vijka ELICHE RADICE B6 Prop Scan tehnologijom [1, 13]

Figure 8. Procedure for measuring the ELICHE RADICE B6 propeller using Prop Scan technology [1, 13]



Slika 9. Dijagram stanja vijka nakon ispitivanja [1, 13]

Figure 9. The propeller state after testing [1, 13]

Iz spomenute usporedbe u Tablici 6. može se zaključiti kako tvorničke značajke vijka ELICHE RADICE B6 približno odgovaraju dobivenima proračunom vijka. Daljna usporedba i analiza geometrijskih i hidrodinamičkih značajki vijka dobivenog proračunom, vijka ELICHE RADICE B6 s tvorničkim značajkama i vijka ELICHE RADICE B6 ugrađenog na ribarskom brodu "Majka Marija" dana je u Tablici 7.

Tablica 7. prikazuje razlike u vrijednostima stupnjeva iskoristivosti vijka  $\eta_0$  ovisno o omjeru uspona  $P/D$  za različita opterećenja vijka  $B_p$ . Najpovoljnije vrijednosti stupnja iskoristivosti vijka  $\eta_0$  su za omjer uspona  $P/D = 0.94$ . Stupanj iskoristivosti vijka  $\eta_0$  glavni je pokazatelj ispravno odabranog vijka. On izravno utječe na ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_T$ . Podaci u Tablici 7. očitani su iz  $B_p - \delta$  dijagrama vijaka tipa B, serije B.4.55. Oni su preliminarni i vrijede za uvjet nominalnog radnog područja dizelskog motora i za maksimalnu brzinu broda.

Tablica 6. Geometrijske i hidrodinamičke značajke vijka  
Table 6. Geometric and hydrodynamic features of the propeller

Geometrijske i hidrodinamičke značajke vijka	Dobivene proračunom vijka	Vijak serije B.4.55 Tablica 5.	ELICHE RADICE B6 tvorničke značajke	ELICHE RADICE B6 "Majka Marija"
$D$ (mm)	1395	1385	1400	1380
$P/D$	0,94	0,96	0,9	0,717
$A_e/A_o$	0,534	0,55	0,568	
$B_p$	20,117	20,117	20,117	20,117
$\eta_0$	0,62	0,613	0,615	0,60
$\eta_H$	1,07	1,07	1,07	1,07
$\eta_R$	1,025	1,025	1,025	1,025
$\eta_D$	0,68	0,672	0,674	0,658
$\eta_S$	0,97	0,97	0,97	0,97
$\eta_e$	0,40	0,40	0,40	0,40
$\eta_T$	0,264	0,26	0,261	0,255

Tablica 7. Stupnjevi iskoristivosti vijka  $\eta_0$   
 Table 7. Levels of propeller efficiency  $\eta_0$

Vijak		Dobiven proračunom	ELICHE RADICE B6 tvorničke značajke	ELICHE RADICE B6 "Majka Marija"
$B_p$	$P/D$	0,94	0,9	0,717
	30,0	$\eta_0$	0,554	0,556
25,0	$\eta_0$	0,58	0,584	0,584
20,0	$\eta_0$	0,615	0,617	0,60
18,5	$\eta_0$	0,632	0,634	0,604
15,0	$\eta_0$	0,653	0,651	0,601
12,5	$\eta_0$	0,672	0,668	0,585
10,0	$\eta_0$	0,688	0,678	0,555
7,5	$\eta_0$	0,688	0,67	< 0,50
5,0	$\eta_0$	0,65	0,60	< 0,40

### ZAKLJUČAK / Conclusion

U radu prikazani proračuni i ispitivanja broskog vijka potvrdili su važnost pravilnog odabira broskog vijka s konstantnim usponom s obzirom na njegov utjecaj na propulziju ribarskog broda. Usporedba najvažnijih geometrijskih značajki između vijaka dobivenih proračunom i vijaka ugrađenih na ribarskim brodovima ukazuje na problematiku pogrešno odabranog broskog vijka. Najčešće se radi o pogrešnom usponu  $P$ , a time i omjeru uspona  $P/D$ . Kao najvažniji pokazatelji navedene problematike, služe vrijednosti stupnja iskoristivosti vijka  $\eta_0$  za različita opterećenja vijka  $B_p$ .

Ovim radom pokazano je kako vrijednosti stupnja iskoristivosti vijka  $\eta_0$  naglo padaju pri nižim opterećenjima vijka  $B_p$  za primjere pogrešno odabranog omjera uspona  $P/D$ . Vijak dobiven proračunom željenih je geometrijskih i hidrodinamičkih značajki i kao takav dobar je izbor unutar porivne strukture ribarskog broda. On ima radnu karakteristiku optimalnog vijka u skladu s dijagramom apsorpcije optimalnog vijka  $P_b/n$  i ima najpovoljniji ukupni stupanj iskoristivosti porivnog sustava  $\eta_T$  za sve faze eksploatacije ribarskog broda.

Zaključno, kako je održivost postojeće ribarske flote od posebnog interesa, pogotovo u ovim vremenima ekonomske krize, prikazani način istraživanja, odnosno proračuna broskog vijka s konstantnim usponom korištenjem  $B_p - \delta$  dijagrama vijaka i kontrolno ispitivanje geometrije vijka uz pomoć Prop Scan tehnologije, ima svoju opravdanost.

### LITERATURA / References

- [1] Adriatic Propeleri Zadar, Prop Scan - Marine Propeller Technology: rezultati mjerenja, Zadar, 2012.
- [2] Antičić, R., Fault Tolerant Control System for Large Diesel Engine in Marine Propulsion, Ph.D. dissertation, Faculty of electric engineering and computing, University of Zagreb, 2002.
- [3] Gerr, D., Propeller Handbook - The complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers, International Marine U.S.A., 2001.
- [4] Lammeren, W. P. A. van, Otpor i propulzija brodova, Zagreb, Brodarski institut Zagreb, 1952.
- [5] Ljubetić, M., Otpor i propulzija broda, Dubrovnik, Pomorski fakultet Dubrovnik, 1989.
- [6] Propeller Dynamics Pty. Ltd., Advanced Propeller Course, Prop Scan - Marine Propeller Technology, Australia
- [7] Radan, D., Uvod u hidrodinamiku broda, Dubrovnik, Sveučilište u Dubrovniku, 2004.
- [8] Sentić, A., Fancev, M., Problemi otpora i propulzije brodova, Zagreb, Brodogradnja Zagreb, 1956.
- [9] Podaci za ribarski brod "Majka Marija", Šibenik, 2002.
- [10] Podaci za brzohodni dizelski motor tipa WM 1312 H, WM Stabilimenti meccanici VM S.p.A., Assistenza Tecnica.
- [11] Podaci za brodski vijak Eliche Radice tipa B6, www.propellersradice.com, 2012.
- [12] <http://www.fsb.unizg.hr>, Šestan, A., Vladimir, N., Porivni sustavi malih brodova, Zagreb, 2010.
- [13] Vetma, V., Kulenović, Z., Antičić, R., Tomas, V., Optimiziranje broskog vijka s konstantnim usponom, Rijeka, Pomorski fakultet Rijeka, Multidisciplinarni znanstveni časopis Pomorstvo, God. 26, Br. 2, 2012.