

Miroslav SAMBOLEK

Brodski vijak - gubitci i stupanj djelovanja

Stručni rad

U članku se prvo govori općenito o stupnju djelovanja tehničkih objekata, te posebno broda. Potom se razmatraju gubici snage što nastaju pri radu brodskoga vijka. Posebna je pozornost posvećena tumačenju fizičkih uzroka gubitaka i objašnjavanju razloga zbog kojih se pri promjeni opterećenja i geometrijskog oblika vijka mijenja njegov stupanj djelovanja. Pokazano je da se najbolji stupanj djelovanja postiže pri vrlo velikim promjerima D , velikim omjerima uspona P/D i maloj brzini vrtnje, te je objašnjeno da su, nažalost, takvi vijci iz praktičnih razloga neostvarivi. Dijagramski je prikazano smanjenje stupnja djelovanja, kada se odstupa od optimalnoga promjera i optimalne brzine vrtnje.

Ključne riječi: brodski vijak, propulzija, stupanj djelovanja, gubici energije

Ship Propeller – Energy Losses and Its Efficiency

Professional paper

The article initially discusses generally the efficiency of technical structures, especially of ships. Then it considers the power losses occurring during the work of propellers. Special attention is devoted to the interpretation of physical causes of loss and to the explanation of the reasons why the change in load and geometrical shapes of propellers shows certain behaviour. It was shown that the best level of usefulness could be achieved at a big diameters D , very high pitch ratio P/D and at low RPM. However, such propellers are for practical reasons unimplementable. The amount of decrease in propeller efficiency, when the optimal diameter and the optimal RPM are not fulfilled, is shown in the diagram.

Keywords: ship propeller, propulsion, efficiency, energy losses

Authors' Address (Adresa autora):

Brodarski institut, Zagreb
E-mail: miroslav.sambolek@hrbi.hr

Received (Primljeno): 2008-12-05

Accepted (Prihvaćeno): 2009-01-28

Open for discussion (Otvoreno za raspravu): 2011-09-30

1. Uvod

Namjera je autora da ovim člankom na temelju jednostavnog razmatranja osnovnih fizičkih pojava, što se odvijaju pri radu propulzora, posebice brodskog vijka objasni mehanizme nastajanja gubitaka energije/snage, i da sustavno, pače zorno grafički, prikaže te gubitke. Nadalje da pokaže kako na veličinu pojedinih vrsta gubitaka utječu geometrijski, kinematički i dinamički uvjeti i parametri i kako se te gubitke može smanjiti. Među mnogim uvjetima koje mora zadovoljiti uspješan brodski vijak [1], [2], [3] (primjerice pogođena radna točka, osigurana čvrstoća, umjerenost, neopasna vibracijska uzbuda, razina emitiranoga šuma bude manja od najveće dopustive, tako da ne stvara probleme ljudima na brodu ni hidroakustičkim uređajima, podnošljiva, po mogućnosti neagresivna - neopasna kavitacija, pa i još neki uvjeti) posebno mjesto zauzima njegov stupanj djelovanja. Taj stupanj je neposredni posljedak gubitaka, pa postaje jasno zašto razmatranje gubitaka nije samo od akademskog interesa, niti je puko zadovoljavanje „tehničke znatiželje“, već ima i veliku praktičnu važnost. Posebno se htjelo pokazati kako se „naplaćuje

globa“ kada se iz praktičnih razloga – ograničenosti prostora na krmi - odstupa od optimalnoga promjera vijka, odnosno kada se na tržištu ne mogu nabaviti pogonski strojevi, tj. dizelski motori koji rade s – glede stupnja djelovanja - najpovoljnijom brzinom vrtnje.

2. Primijenjeni simboli

U radu su, gdje god je to bilo moguće, tj. kada su postojali, primijenjeni simboli iz popisa koji je preporučio ITTC 2008. godine [4]. Simboli potrebni za označavanje fizičkih veličina koje se pojavljuju u ovom radu, a nema ih u spomenutom popisu komponirani/sastavljeni su u skladu sa smjericama koje su dane u [4] na stranici 128. Bezdimenzijske veličine, koje mogu biti veće od jedan nije u redu nazivati stupnjevim djelovanja, već ih se zove *koeficijentima utjecaja*, kao primjerice η_H – koeficijent utjecaja trupa. Svi simboli koji se pojavljuju u radu abecednim su redom nanizani u tablici 1, a osim hrvatskih naziva dani su i engleski, te pripadne mjerne jedinice. Tako ova tablica, osim što omogućuje praćenje izlaganja, služi i kao mali rječnik najčešćih stručnih naziva za područje propulzije broda.

Tablica 1 **Primijenjeni simboli**
Table 1 **List of used symbols**

Simbol - Oznaka	hrvatski	engleski	jedinice
$a_E = A_E/A_0$	omjer raširene površine vijka	<i>Expanded blade area ratio</i>	1
A	površina projiciranoga krila ili profila	<i>Projected area (of lifting surface)</i>	m ²
$A_0 = D^2 \pi/4$	površina diska vijka	<i>Disc area</i>	m ²
A_E	raširena površina (svih krila vijka)	<i>Expanded blade area</i>	m ²
$C_D = \frac{D_F}{\rho / 2 V^2 A}$	koeficijent otpora profila	<i>Section drag coefficient</i>	1
$C_{Th} = \frac{T}{\rho / 2 A_0 V_A^2}$	koeficijent opterećenja porivom	<i>Thrust loading coefficient, energy loading coefficient</i>	1
D	promjer vijka	<i>Propeller diameter</i>	m
D_F	otpor krila ili profila	<i>Foil drag</i>	N
D_{opt}	optimalni promjer vijka	<i>Optimal propeller diameter</i>	m
N	brzina vrtnje vijka	<i>Propeller frequency or rate of revolution</i>	1/min
N_{opt}	optimalna brzina vrtnje vijka	<i>Optimal propeller frequency</i>	1/min
P_{+w}	povećanje snage zbog energije viskozna sustrujanja	<i>Power recovery due to energy in viscous wake</i>	kW
$p=P/D$	omjer uspona vijka	<i>Pitch ratio</i>	1
P_{AL}	gubitak snage zbog translacije mlaza	<i>Translational power loss</i>	kW
P_B	kočena snaga pogonskoga stroja	<i>Brake power</i>	kW
P_D	propulzoru predana snaga	<i>Delivered power, propeller power</i>	kW
P_E	efektivna snaga (snaga otpora) broda	<i>Effective power, resistance power</i>	kW
P_F	kemijska snaga goriva	<i>Fuel power</i>	kW
P_{GL}	gubitak snage u reduktoru	<i>Power loss in gearing</i>	kW
P_I	indicirana snaga	<i>Indicated power</i>	kW
P_J	snaga mlaza propulzora	<i>Propeller jet power</i>	kW
P_{ML}	gubitak mehaničke snage u glavnom stroju	<i>Mechanical power loss in engine</i>	kW
P_{PL}	gubitak snage u crpki $P_{PL} = P_{RL} + P_{VL}$	<i>Pump power loss</i>	kW
P_{RL}	gubitak snage zbog rotacije mlaza	<i>Rotational power loss</i>	kW
P_{RRL}	gubitak snage zbog nejednolikosti brzine na krmu	<i>Power loss due to behind ship condition</i>	kW
P_S	osovinska snaga	<i>Shaft power</i>	kW
P_{SL}	gubitak snage u osovinskom vodu	<i>Power loss in shafting</i>	kW
P_T	snaga poriva izoliranoga propulzora	<i>Thrust power (isolated propeller)</i>	kW
P_{-t}	smanjenje snage zbog upijanja	<i>Power loss due to thrust deduction</i>	kW
P_{TB}	snaga poriva propulzora iza trupa	<i>Thrust power behind ship</i>	kW
P_{TL}	gubitak snage termodinamičkoga procesa	<i>Thermodynamical power loss</i>	kW
P_{VL}	gubitak snage zbog viskoznosti	<i>Viscous power loss</i>	kW
Q	moment vrtnje	<i>Torque</i>	Nm
U_{A0}	aksijalna inducirana brzina u disku	<i>Axial velocity induced by propeller at disc</i>	m/s
$V_P = V_A + U_{A0}$	srednja aksijalna komponenta brzine u ravnini (disku) vijka	<i>Mean axial velocity at propeller plane</i>	m/s
V_A	brzina pritjecanja	<i>Propeller advance speed</i>	m/s

Simbol - Oznaka	hrvatski	engleski	jedinice
z	broj krila vijka	<i>Number of propeller blades</i>	1
α	napadni kut profila vijčanoga krila	<i>Angle of attack</i>	rad
$\eta_B = P_{TB}/P_D = \eta_O \eta_R$	stupanj djelovanja propulzora iza broda	<i>Propeller efficiency behind ship</i>	1
$\eta_D = P_E/P_D$	(hidrodinamički) stupanj djelovanja propulzije	<i>Propulsive efficiency or quasi-propulsive coefficient</i>	1
$\eta_G = P_S/P_B$	stupanj djelovanja reduktora	<i>Gearing efficiency</i>	1
$\eta_{GS} = P_D/P_B$	stupanj djelovanja transmisije	<i>Transmission efficiency</i>	1
$\eta_H = P_E/P_{TB} = (1-t)/(1-w)$	koeficijent utjecaja trupa	<i>Hull efficiency</i>	1
$\eta_{JP} = P_J/P_D$	stupanj djelovanja crpke	<i>Propeller pump or hydraulic efficiency</i>	1
$\eta_M = P_B/P_I$	mehanički stupanj djelovanja glavnoga stroja	<i>Mechanical efficiency</i>	1
$\eta_O = P_T/P_D = \eta_{JP} \eta_{TJ}$	stupanj djelovanja izoliranoga propulzora	<i>Propeller efficiency in open water</i>	1
$\eta_P = P_E/P_B = \eta_D \eta_{GS}$	(ukupni) stupanj djelovanja propulzije	<i>Overall propulsion efficiency</i>	1
$\eta_R = P_{TB}/P_T = \eta_B/\eta_O$	koeficijent utjecaja prijelaza	<i>Relative rotative efficiency</i>	1
$\eta_S = P_D/P_S$	stupanj djelovanja osovinskog voda	<i>Shafting efficiency</i>	1
$\eta_{therm} = P_I/P_F$	termodinamički stupanj djelovanja glavnoga stroja	<i>Thermal efficiency, fuel efficiency</i>	1
$\eta_{TJ} = P_T/P_J = 2 / (\sqrt{1 + C_{TL}})$	stupanj djelovanja mlaza propulzora	<i>Propeller jet efficiency</i>	1
ρ	gustoća (vode)	<i>Mass density (of water)</i>	kg/m ³
ω	kutna brzina vijka	<i>Angular velocity</i>	rad/s

3. Općenito o stupnju djelovanja

S korisnošću nekoga stroja ili procesa, brojevno kvantificiranim *stupnjem djelovanja*, inženjeri se susreću svakodnevno. To svojstvo nije povezano samo s gospodarstvenom koristi, koja je vrlo često najvažnija, već utječe i na neke dodatne odlike promatranoga tehničkog objekta. Primjerice, za ratni brod velika vrijednost stupnja djelovanja η_p omogućuje smanjenje potrebne snage glavnoga stroja i posljedično težine propulzijskoga kompleksa, što dopušta povećanje radijusa djelovanja broda, odnosno omogućuje ukrcavanje dodatnoga korisnog tereta – oružja i opreme. Na trgovačkom brodu veliki η_p znači i jeftiniji glavni stroj, te – što je posebno važno u naše doba velike osjetljivosti za dobrobit i očuvanje okoliša – smanjuje količinu ispušnih plinova.

Kod trgovačkoga broda, kao objekta za kojega je bitno važna isplativost uloženoga novca, da bi se postigla najveća moguća zarada, pored mnogih raznovrsnih čimbenika vrlo važnu ulogu ima smanjenje pogonskih troškova broda. Ti troškovi osim o stupnju djelovanja vijka ovise i o glavnom stroju. Kako se glavni stroj i brodski vijak međusobno uvjetuju to se dobra ekonomičnost može ostvariti samo ako se ta dva elementa propulzijskoga sustava broda optimiraju kao cjelina. Ali pri izboru toga sustava ipak treba voditi brigu i o ostalim sastavnicama broda kao globalnog, ukupnog sustava.

Danas kada su stalni troškovi broda u službi, zbog – zahvaljujući automatizaciji – velikog smanjenja broja članova posade, bitno smanjeni, to više dolaze do izražaja troškovi pogonskoga goriva. Bez obzira na stalno mijenjanje cijene pogonskih goriva, svakako treba smanjiti njihovu potrošnju na brodu, ne samo da se

u većoj ili manjoj mjeri uštedi novac, već i da se okoliš poštedi od zagađivanja. Štednja goriva ostvaruje se kako usavršavanjem termodinamičkoga procesa i konstrukcije pogonskih strojeva, tako i poboljšanjem hidrodinamičkih svojstava broda (otpor, stupanj djelovanja propulzora, međudjelovanje trupa, propulzora i kormila ...), te nastojanjem da se što veći dio izgaranjem goriva proizvedene topline korisno uporabi. Dojmljivo je vidjeti na kako se domišljat način iskorištava ne samo „kvalitetnija“ toplinska energija medija više temperature za proizvodnju mehaničkog rada, već i kako se brižljivo čuva energija „manje kakvoće“ iskoristiva za grijanje.

Nadalje će se u ovom članku govoriti isključivo o hidrodinamičkim problemima iskoristivosti energije i oblicima gubitaka pri radu brodske vijka.

4. Uzroci i vrste gubitaka kod brodskih propulzora

Vjerojatno nije naodmet podsjetiti da je stupanj djelovanja svakog uređaja, pa tako i brodske vijka, kao kvocijent korisne i utrošene snage uvijek manji od jedan, jer se ne mogu izbjeći raznovrsni gubici; a to znači da se snaga dovedena brodom vijku samo dijelom korisno potroši, dok se dio izgubi – a upravo će o tim gubicima ovdje biti riječ.

Kao što je mnogima poznato [5], [6], [7], gubici energije, odnosno snage, što se javljaju pri djelovanju brodske vijka posljedica su:

a) radom brodske vijka, izazvanih, *induciranih brzina* translacije i vrtnje mlaza što postoje iza vijčanoga propulzora, te

b) zbog viskoznosti nastalog, *otpora vode* kojega krila brodskog vijka trpe pri relativnom gibanju kroz vodu.

Prvospomenuti gubici, kao neposredna posljedica *induciranih* brzina, u najvećoj mjeri ovise o izabranom promjeru brodskog vijka D i njegovoj brzini vrtnje N , što se odražava na omjeru uspona P/D , i o njima će se ovdje ponajviše raspravljati.

Gubitak snage zbog *viskozno*g otpora izražen je umnoškom sile otpora vijčanoga krila i relativne brzine njegova gibanja prema okolnoj vodi. Specifična sila otpora, tj. viskozno smično naprezanje na površini vijčanoga krila, samo u manjoj mjeri ovisi o opterećenju vijka (i to u mjeri u kojoj promjena napadnoga kuta α utječe na koeficijent otpora C_D profila vijčanoga krila), a također malo ovisi i o promjeru vijka i brzini broda (preko ovisnosti koeficijent otpora profila C_D o Reynoldsovu broju). Međutim gubitak snage zbog viskoznosti, pri stalnom promjeru vijka D , jako je ovisan o ploštini površine vijčanih krila, tj. o omjeru A_E/A_0 i o hrapavosti odnosno glatkoći (glatkoća zapravo ne postoji – postoji samo hrapavost, a glatkoća je nepostojanje hrapavosti) površine krila. Hrapavost površine ovisi o finoći završne obrade vijka kod proizvođača, ali mnogo više o obraštenosti vijka, koja se povećava s vremenom provedenim u službi nakon dokiranja. Pri istoj brzini broda brzina krila relativno prema vodi ovisi o brzini vrtnje (pritom se omjer uspona P/D smanjuje s povećavanjem brzine vrtnje), pa o toj brzini u velikoj mjeri ovisi i viskozni otpor krila.

Na slici 1 prikazano je kako se od u jedinici vremena doveđene kemijske energije goriva, nakon niza raznovrsnih gubitaka nastalih tijekom raznovrsnih uzastopnih transformacija energije, dolazi do korisne efektivne snage (drugi je naziv *snaga otpora*) broda P_E . Crtež sam sve govori, pa ga nije potrebno komentirati, osim što treba napomenuti da gubitak toplinske energije P_{TL} (*thermodynamical loss*) i gubitak, disipacija, mehaničke energije u mehanizmu toplinskoga stroja P_{ML} , nisu predmet ovoga članka i da su prikazani samo radi potpunosti informacije o ukupnim gubicima.

Izračunavanje pojedinih nepoznatih snaga iz poznatih može se provesti pomoću stupnjeva djelovanja koristeći sljedeći sustav formula:

$$P_B = P_I \eta_M$$

$$P_S = P_B \eta_G$$

$$P_D = P_S \eta_S = P_B \eta_G \eta_S = P_B \eta_{GS}$$

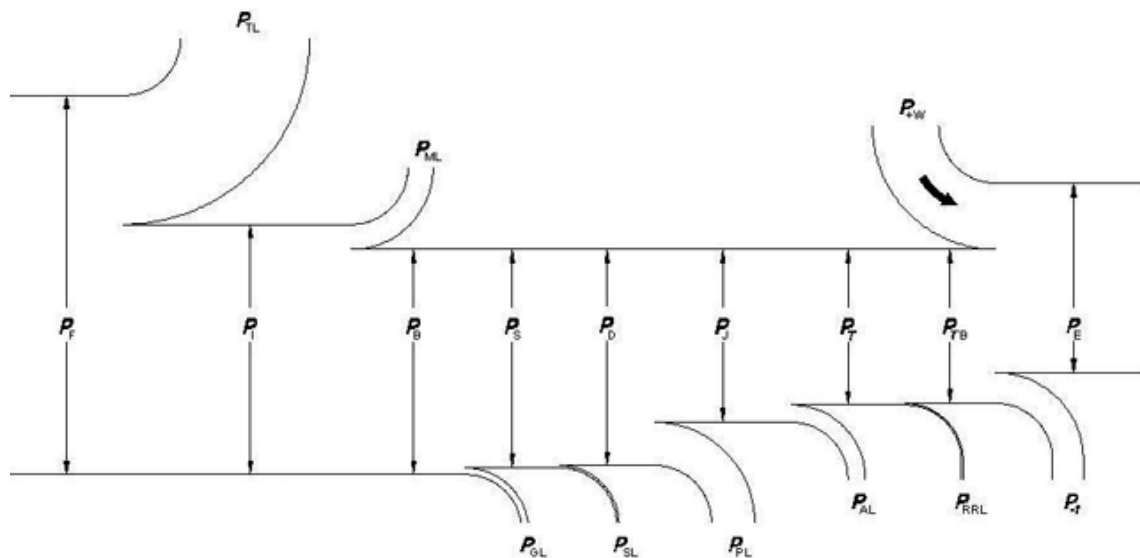
$$P_J = P_D \eta_{JP} = P_B \eta_{GS} \eta_{JP}$$

$$P_T = P_J \eta_{TJ} = P_B \eta_{GS} \eta_{JP} \eta_{TJ} = P_B \eta_{GS} \eta_O$$

$$P_{TB} = P_T \eta_R = P_B \eta_{GS} \eta_O \eta_R = P_B \eta_{GS} \eta_B$$

$$P_E = P_{TB} \eta_H = P_B \eta_{GS} \eta_B \eta_H = P_B \eta_{GS} \eta_D = P_B \eta_P = P_D \eta_D$$

Slika 1 **Grafički prikaz gubitaka energije na pojedinim mjestima tijekom procesa pretvorbe energije goriva u snagu poriva broda**
Figure 1 **Graphical representation of energy losses occurring during a process of the fuel energy conversion into the effective power**



P_F - kemijska snaga goriva / Fuel power

P_{TL} - gubitak snage termodinamičkoga procesa / Thermodynamical power loss

P_I - indicirana snaga / Indicated power

P_{ML} - gubitak mehaničke snage u glavnom stroju / Mechanical power loss in engine

P_B - kočena snaga pogonskoga stroja / Brake power

P_{GL} - gubitak snage u reduktoru / Power loss in gearing

P_S - osovinska snaga / Shaft power

P_{SL} - gubitak snage u osovinskom vodu / Power loss in shafting

P_D - propulzoru predana snaga / Delivered power, propeller power

P_{PL} - gubitak snage u crpki $= P_{RL} + P_{VL}$ / Pump power loss

P_J - snaga mlaza propulzora / Propeller jet power

P_{AL} - gubitak snage zbog translacije mlaza / Translational power loss

P_T - snaga poriva izoliranoga propulzora / Thrust power (isolated propeller)

P_{RRL} - gubitak snage zbog nejednolikosti brzine na krmi / Power loss due to behind ship condition

P_{TB} - snaga poriva propulzora iza trupa / Thrust power behind ship

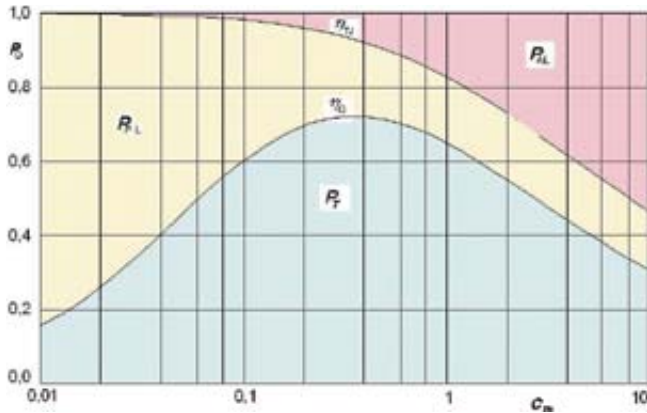
P_- - smanjenje snage zbog upijanja / Power loss due to thrust deduction

P_+ - povećanje snage zbog energije viskoznoga sustrujanja / Power recovery due to energy in viscous wake

P_E - efektivna snaga (snaga otpora) broda / Effective power, resistance power

U netom napisanim formulama primijenjeni su stupnjevi djelovanja, odnosno koeficijenti utjecaja, koji su definirani u tablici 1.

Treba primijetiti da je na slici 1 simbolički prikazano kako je snaga otpora P_E „dobivena“ iz snage poriva u uvjetima iza broda P_{TB} na taj način da se dio snage izgubio zbog povećanoga otpora zbog upijanja P_{-} , te da se dio snage P_{+w} dobio iz kinetičke energije graničnoga sloja, tj. iz viskoznoga susrujanja.

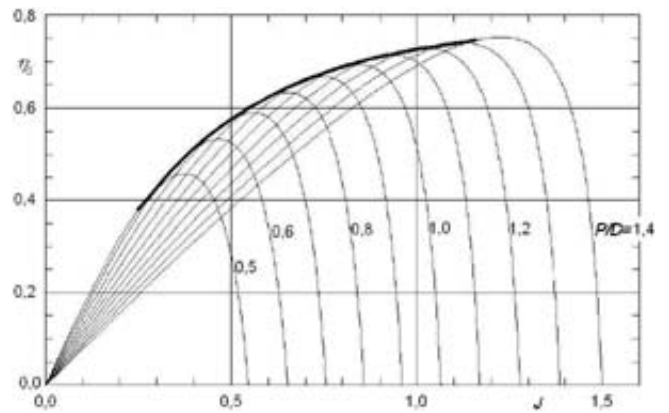


Slika 2 U log-lin dijagramu prikazana raspodjela snage u ovisnosti o koeficijentu opterećenja vijka porivom C_{th} ; vijak je niza WB.5.65 s omjerom uspona $P/D=1,1$; područja između krivulja odgovaraju pojedinim snagama
 Figure 2 In the log-Lin diagram power distribution depending on thrust loading coefficient C_{th} is shown; the propeller is WB.5.65 with pitch ratio $P/D=1.1$; domains between the curves correspond to singular/diverse powers

Na slici 2 prikazani su raznovrsni gubici jednoga konkretnog vijka u ovisnosti o koeficijentu opterećenja C_{th} . Tim je koeficijentom određen stupanj djelovanja mlaza η_{TJ} , koji je najvažniji parametar o kojemu ovisi stupanj djelovanja izoliranog vijka η_0 . Područje ispod krivulje η_0 predstavlja korisno utrošenu snagu poriva P_T ; područje iznad krivulje η_{TJ} do vrijednosti 100 posto, jest snaga P_{AL} , utrošena na stvaranje (načelno *nužne*) kinetičke energije translacije mlaza. Između krivulja η_0 i η_{TJ} je područje snage izgubljene „u crpki“ - P_{PL} , a ona je zbroj snage P_{RL} upotrijebljene za stvaranje (načelno *nepotrebne*) kinetičke energije rotacije mlaza i snage izgubljene za svladavanje viskoznih gubitaka P_{VL} .

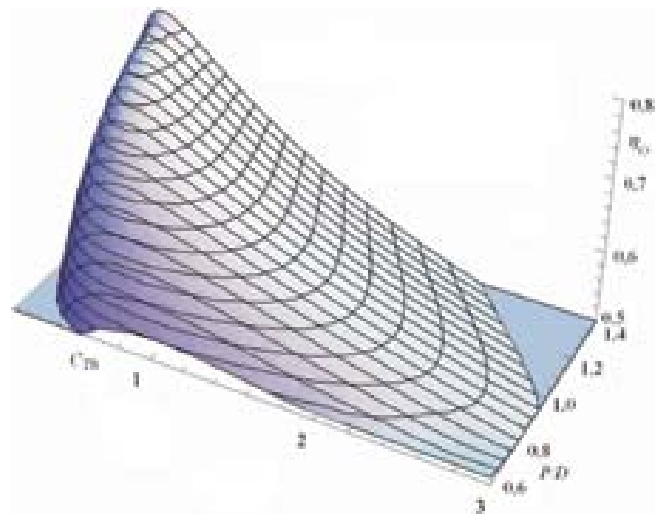
5. Fizičko tumačenje ovisnosti gubitaka o geometriji vijka

Na slici 3 prikazan je dobro poznati osnovni dijagram jedne od najvažnijih hidrodinamičkih značajki brodske vijka, tj. stupnja djelovanja izoliranoga vijka [1]. Dijagram se odnosi na brodske vijake niza $A_E/A_0 = 0,6$ sa $z = 5$ krila. Prikazana je i ovojnica obitelji krivulja koje predočuju stupanj djelovanja η_0 . Najveći stupanj djelovanja postiže se najvećim omjerom P/D koji je za WB vijake ograničen na $P/D = 1,4$. Namjera je prikaza ukazati na činjenicu da se najveći ostvarivi η_0 povećava s povećanjem omjera uspona P/D u ispitanom području. Međutim, može se naslutiti da će kod još većih omjera P/D stupanj djelovanja η_0 početi padati.



Slika 3 Ovisnost stupnja djelovanja brodske vijka wageninške serije WB.5.70 o koeficijentu napredovanja i omjeru uspona P/D
 Figure 3 Dependence of the efficiency of Wageningen WB.5.70 screw propellers on advance coefficient and pitch ratio P/D

Povećanje η_0 s povećanjem P/D može se lijepo vidjeti i na trodimenzijskom dijagramu na slici 4. Tamo je prikazana ploha stupnja djelovanja u ovisnosti o koeficijentu C_{th} i omjeru uspona P/D ; opet je lako uočiti da se najveći stupanj djelovanja postiže s brodskim vijkom s omjerom $P/D=1,4$ pri nekoj relativno maloj vrijednosti koeficijenta opterećenja C_{th} .



Slika 4 Trodimenzijski prikaz ovisnosti stupnja djelovanja η_0 vijaka niza WB.5.70 o koeficijentu opterećenja porivom C_{th} i o omjeru uspona P/D
 Figure 4 3D presentation of the propeller efficiency in open water η_0 of WB.5.70 propellers as a function of thrust loading coefficient C_{th} and the pitch ratio P/D

Ako se pomnije promotri sliku 4 može se zapaziti da se kod velikih opterećenja vijka porivom C_{th} najviši stupanj djelovanja ostvaruje s malim P/D , dok se sa smanjivanjem opterećenja najbolji stupanj djelovanja postiže pri sve većim P/D .

Fizički uzroci takvoga vladanja stupnja djelovanja mogu se ovako objasniti. S povećanjem opterećenja C_{th} povećavaju se gubici snage $P_{AL} = P_D(1 - \eta_{TJ}(C_{th}))$ utrošene na stvaranje kinetičke

energije translacije mlaza iza vijka, koji u postotcima predane snage iznose:

$$\frac{\sqrt{1 + C_{th}} - 1}{\sqrt{1 + C_{th}} + 1} \cdot 100\%$$

kao što se vidi i na slici 2. Također se i masa koja u jedinici vremena protječe kroz vijak povećava s povećanjem opterećenja, a to je posljedica povećane aksijalne komponente inducirane brzine. Količina izgubljene kinetičke energije rotacije mlaza u prvom grubom približenju ovisi o dinamičkom momentu tromosti „vodenog valjka“ kojemu je promjer jednak promjeru vijka, a visina jednaka (srednjoj) brzini strujanja kroz disk vijka $V_p = V_A + U_{A0}$ i o kvadratu kutne brzine, te mase vode. Konstantna snaga koja se predaje vijku jednaka je $P_D = Q \cdot \omega$, tako da je pri maloj kutnoj brzini vrtnje ω moment Q velik i obrnuto. Za konstantnu/zadanu brzinu broda (i konstantnu snagu P_D) vijci koji se sporo vrte imaju veći omjer uspona P/D , a i moment Q im je veći - i obrnuto. Moment Q prenosi se na masu vode u spomenutom valjku i prema relaciji analognoj Newtonovu zakonu prirast kutne brzine rotacije, tj. kutno ubrzanje, veći je kad je moment veći. To znači da će se vodeni valjak kod većega Q , a ujedno i većega P/D brže vrtjeti, pa će i gubitak kinetičke energije rotacije biti veći.

Energija utrošena na svladavanje viskozni otpora jednaka je umnošku puta kojega je krilo vijka prošlo kroz vodu, i sile otpora krila, koja je - kao što je već rečeno, skoro neovisna o omjeru P/D . To znači da pri malom opterećenju kada su „neviskozni gubici“ P_{AL} i P_{RL} mali dolazi do izražaja, dominira P_{VL} , a to znači da tada P/D mora biti velik, dok kod velikoga C_{th} uz velike gubitke kinetičke energije $P_{AL} + P_{RL}$ i male viskozne gubitke P_{VL} treba, da bi se postigao veliki stupanj djelovanja odabrati manji omjer P/D i time smanjiti P_{RL} .

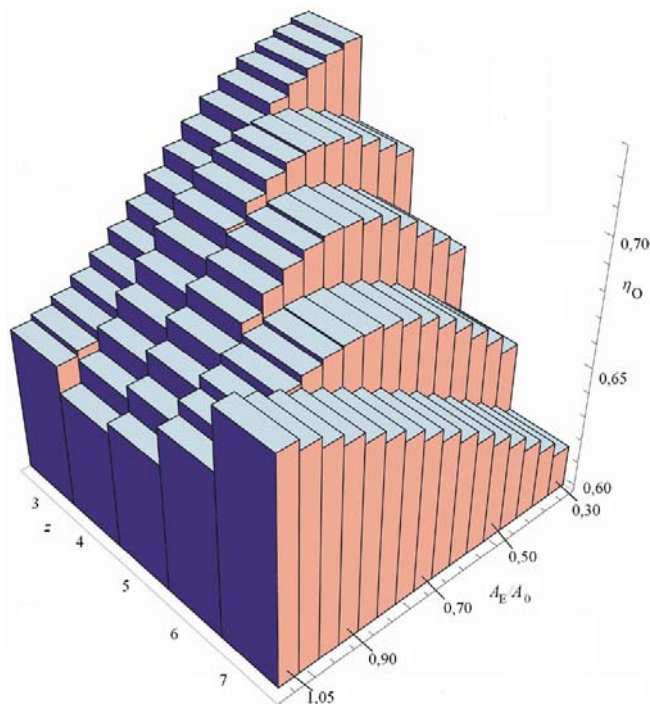
6. Najveći stvarno postizivi stupnjevi djelovanja izoliranih vijaka WB niza

Ovdje će se analizirati uvjeti pod kojima se postiže eksperimentalni maksimalni η_o . U bazenu u Wageningenu ispitani su sustavni niz modela vijaka –WB nize – koji je obuhvatio modele s 3 do 7 krila, dok je omjer A_E/A_0 varirao od 0,3 do 1,15.

Vrijednost najvećega stupnja djelovanja η_o (koji se, kako je već ustanovljeno – slika 3, ostvaruje pri $P/D=1,4$) pojedinih vijaka iz niza ovisi o broju krila z i o omjeru ploština A_E/A_0 ; on je veći od 70 posto, ali se relativno malo mijenja s mijenjanjem spomenutih parametara oblika. Na slici 5 prikazan je stupčasti dijagram (engleski „bar chart“) koji opisuje spomenuti stupanj djelovanja.

Ako je poznata brzina pritjecanja vode brodski vijak u V_A , i poriv T koji treba razviti propulzor da bi se ostvarila zahtijevana brzina broda, može se uz poznate $P/D = 1,4$, A_E/A_0 i z odrediti optimalne vrijednosti promjera vijka D_{opt} i njegove brzine vrtnje N_{opt} u min^{-1} , koji daju najveći mogući η_o .

Ovakvo određene vrijednosti redovito su u praksi neostvarive; naime, sa stajališta η_o optimalni promjer D_{opt} je redovito veći od najvećega ugradivog (gaz broda i raspoloživi prostor na krmu ograničen potrebnom zračnosti da se izbjegne vibracijska uzbuda), a optimalna brzina vrtnje N manja je od minimalnih vrijednosti što ih nude proizvođači motora. Ipak bi se u slučaju električnoga prijenosa snage (brzokretni pogonski stroj/evi ->

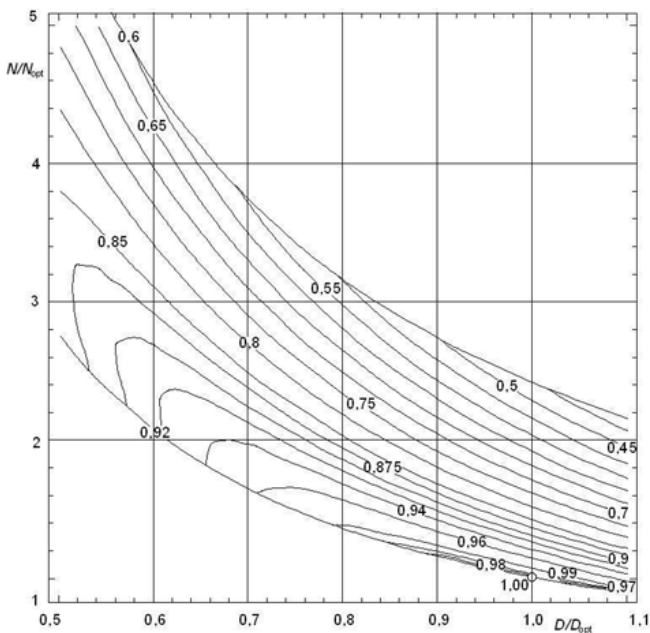


Slika 5 Prikaz u stupčastom dijagramu ovisnosti stupnja djelovanja η_o postizivoga pri $P/D=1,4$ pri raznim omjerima A_E/A_0 i raznom broju krila z

Figure 5 Bar-chart presentation of the propeller efficiency in open water η_o of the WB propellers with $P/D=1.4$, depending on the blade area ratio A_E/A_0 and the number of blades z

Slika 6 Prikaz smanjenja stupnja djelovanja vijka pri smanjenju promjera i pri povećanju brzine vrtnje

Figure 6 Dropping of the propeller efficiency in open water η_o by reducing the propeller diameter and increasing the RPM



električni generator -> elektromotor -> propulzor) mogla postići zahtijevana mala brzina vrtnje vijka, ali ne treba zaboraviti da su elektromotori s *malom brzinom vrtnje* (baš kao i svi spori pogonski strojevi) glomazni, teški i skupi.

Prikladno je odnose promjera, brzine vrtnje i stupanj djelovanja prikazati u bezdimenzijskom obliku, tj. u dijagramu kojemu je na osi apscisa nanesen kvocijent D/D_{opt} - tj. promjer vijka normiran s promjerom D_{opt} koji daje uz N_{opt} apsolutno najveći stupanj djelovanja, dok je na osi ordinata nanesena normirana brzina vrtnje N/N_{opt} , slika 6.

U tom su dijagramu ucrtane krivulje konstantnoga stupnja djelovanja η_o ; ta obitelj krivulja omeđena je graničnim vrijednostima omjera P/D za WB vijke. U lijevom donjem području trebali bi biti $P/D > 1,4$, a u desnom gornjem području $P/D < 0,5$. Također je prikazana krivulja koja odgovara najboljem D/D_{opt} za poznati N/N_{opt} . Promatranjem dijagrama može se uočiti da se sa smanjenjem promjera u odnosu na D_{opt} stupanj djelovanja ne smanjuje mnogo kada se za relativno male vrijednosti poveća N/N_{opt} , tako da je $P/D = 1,4$. Naprotiv, povećanje N/N_{opt} uz $D/D_{opt} = 1$ dovodi do manje izraženoga smanjenja stupnja djelovanja.

7. Zaključak

Pokazano je kakvi se sve gubici (ne samo hidrodinamički) pojavljuju u propulzijskom sustavu broda. To je korisno za uočavanje veličine izvora gubitaka snage i usmjeravanje napora na smanjivanje najvećih gubitaka. Dijagramom je pokazano da se energija utrošena na stvaranje graničnoga sloja broda iskorištava radom propulzora.

Snaga predana propulzoru iskorištava se u obliku snage poriva, i troši na pokrivanje gubitaka u propulzoru, te na stvaranje mlaza. Pri beskonačno malom opterećenju, izraženom koeficijentom opterećenja vijka, sva se snaga potroši na propulzoru, a s povećanjem opterećenja snaga poriva se isprva povećava, a potom se smanjuje, dok snaga za stvaranje mlaza stalno raste. O konstrukciji propulzora, posebno kod vijka o omjeru uspona, omjeru raširene površine i broju krila, ovisi opterećenje pri kojem će se postići najveći stupanj korisnosti.

Modelski rezultati Wageningenskog B niza pokazuju da se najveći stupnjevi djelovanja postižu kod najvećih ispitanih omjera uspona, tj. pri $P/D = 1,4$ i da bi se oni još nešto povećali da se

ispitalo modele s većim omjerom uspona; nadalje pokazuju da su pri malom opterećenju povoljniji vijci s većim omjerom uspona. Ta je činjenica podrobno objašnjena kvalitativnom analizom očitih fizičkih odnosa gubitaka nastalih zbog rotacije i viskoznosti.

Najveći stupnjevi djelovanja mogli bi se postići ako bi se ugradili vijci vrlo velikoga promjera, s najvećim mogućim omjerom uspona, koji bi se vrlo sporo vrtjeli. Međutim, kako su vijci optimalnoga promjera preveliki da bi se mogli ugraditi, a ne proizvode se pogonski strojevi sa zahtijevanom malom brzinom vrtnje, to je redovito promjer manji od optimalnog, a brzina vrtnje veća od optimalne. Kako na smanjenje praktično neostvarivog optimalnog stupnja djelovanja djeluje smanjenje promjera i povećanje brzine vrtnje, prikazano je dijagramom odgovarajućih omjera.

Članak će pružiti korisne informacije i smjernice inženjerima koji rutinski obavljaju posebno važan i odgovoran posao projektiranja broda. Ali može biti zanimljiv i radoznalim inženjerima brodogradnje koji žele pobliže upoznati fizičke procese i uvjete stvaranja poriva, kao i uzroke i vrste gubitaka snage pri radu vijka.

8. Literatura

- [1] van MANEN, J. D.: "Fundamentals of Ship Resistance and Propulsion", N.S.M.B. Publication No. 132a, Rotterdam, 1960.
- [2] BERTRAM, V.: "Practical Ship Hydrodynamics", Butterworth&Heinemann, 2000.
- [3] ARTJUŠKOV, L. S., AČKINADZE, A. Š., RUSECKIJ, A. A.: "Sudovye dvižiteli", Sudostroenie, Leningrad, 1988.
- [4] ...: "ITTC Symbols and Terminology List", Version 2008, <http://ittc.sname.org/new%20recomendations/Symbols%20List/Structured%20List2008.pdf>.
- [5] SAMBOLEK, M.: "O stupnju djelovanja propulzora", Zbornik radova III. simpozija "Teorija i praksa brodogradnje", Zagreb, 1978.
- [6] HARVALD, S., A.: "Resistance and Propulsion of Ships", A Wiley-Interscience Publication – John Wiley & Sons, 1983.
- [7] SAMBOLEK, M.: „Reaktivni propulzori - osnovni pojmovi i spoznaje“, Brodogradnja 57 (2006) 4, p. 332-338.



FOR SIGNIFICANT CUSTOMERS



SIGNIFICANT SHIPS

Croatian shipyard with a long tradition and experience in designing and building various types of ships, always significant in their class.

BRODOSPLIT Shipyard LTD.
Put Supavla 21, 21000 SPLIT, Croatia, P.O.Box 517
Phone. +385 (21) 382 617, 382 428, Fax. +385 (21) 382 648
www.brodosplit.hr



ULJANIK



Efficiency



Versatility



Practicability



Durability



Safety



www.uljanik.hr

we know HOW TO TURN
ideas
INTO PRACTICAL
realities

Our cooperation and our technical skills with professional staff and stable management offer you an opportunity to build ships according to your own ideas and requests.

ULJANIK Shipyard

- Founded in 1856
- Educated personnel
- CAD/CAM system
- ISO 9001, ISO 14000
- Diesel engine MAN-B&W licence
- High quality of various types of ships



ULJANIK

ULJANIK Brodogradilište d.d. Flacijusova 1, 52100 PULA, Croatia
Tel. +385 (52) 374 000 - Switchboard; +385 (52) 374 450 - Sales Dept.
Fax. +385 (52) 374 504 E-mail: sales.dept@uljanik.hr



3. MAJ

Shipyard

3. MAJ Brodogradilište d.d.
Liburnijska 3, P.O.Box 197
51000 RIJEKA, Croatia
Sales Division
Phone: **+385 (51) 61 13 80, 61 10 16**
Fax: **+385 (51) 61 18 10**
e-mail: salesdpt@3maj.hr
www.3maj.hr

KRALJEVICA SHIPYARD

SHIPBUILDING SINCE 1729

The **KRALJEVICA** Shipyard, shipbuilding and shiprepairing company, is the oldest shipyard on the eastern coast of the Adriatic Sea.

The continuity of shipbuilding in **KRALJEVICA** has been lasting uninterrupted since 1729, when the Shipyard has been established by the Austrian Emperor Karl VI.



The **KRALJEVICA** Shipyard ranks, in view of its capacities, among medium-sized shipyards (500 employees, area of 110,000 m²).

The **KRALJEVICA** Shipyard's activities are divided in three main groups: newbuildings (asphalt tankers, multipurpose vessels, container vessels, dry cargo vessels, paper carriers, RO-RO vessels, car ferries, offshore supply vessels, tugs, yachts, fishing vessels, small aluminum crafts, etc.), navy vessels (patrol vessels, corvettes, coast guard vessels, etc.), shiprepairing/retrofitting (merchant and navy vessels).

As from the end of Second World War, the Shipyard built more than 180 vessels of which 80 navy vessels and more than 100 merchant vessels on two open slipways of up to 10,000 tdw (125 x 21 m) and one sheltered slipway in hall (for vessels up to 60 x 11 m).

Shiprepairing and marine service-conversions for vessels up to 25,000 tdw in two floating docks of 450 tons and 6,500 tons lifting capacity (for vessels of maximum 155 x 21 m), and on shiprepairing quay of 575 meters in length.

The Shipyard have awarded for his quality two prestigious prizes:

- in Year 1989 for RO-RO/Container/paper carrier of 3,400 tdw as one of **the Most Outstanding Ship of the Year** (by US magazine "Maritime Reporter & Engineering News")
- in Year 2005 for Asphalt carrier of 9,200 tdw as one of **the Significant Ship of the Year** (by UK magazine "The Naval Architect")



KRALJEVICA Shipyard

Obala Kralja Tomislava 8, P.O.Box 35,
51262 Kraljevica, Croatia
Sales Department
Tel.: +385 (51) 416 278
Fax: +385 (51) 416 405
e-mail: bk-sales@brodokr.hr

www.brodokr.hr

Tradition

Quality

Innovation



SHIPYARD TROGIR



BRODOTROGIR d.d.
SHIPYARD TROGIR
TROGIR - CROATIA

SHIPYARD TROGIR

Put brodograditelja 16
21220 TROGIR - CROATIA

Phone:

+385 21 / 883 333 (Switchboard)
+385 21 / 883 201 (Sales Department)

Fax:

+385 21 / 881 881 (Central)
+385 21 / 883 417 (Sales Department)
e-mail: sales@brodotrogir.hr



SHIPREPAIR DIVISION

Put brodograditelja 16
21220 TROGIR - CROATIA

Phone: +385 21 / 883 303
Fax: +385 21 / 883 406

E-mail: repairsales@brodotrogir.hr

www.brodotrogir.hr

ncp

NAUČIKI CENTAR PRGIN



www.ncp.hr

REMONT
održavanje jahti



MARINA
Lat. 43° 43.0' N
Long. 015° 54.3' E



CHARTER
i škola jedrenja



NCP - Remontno brodogradilište Šibenik
Obala J. Šižgorića 1, CROATIA - Šibenik
t. +385 22 312 971 / sales@ncp.hr

NCP - Marina Mandalina
Obala J. Šižgorića 1, CROATIA - Šibenik
t. +385 22 312 975 f. +385 22 312 976
marina@ncp.hr

NCP - Charter
Obala J. Šižgorića 1, CROATIA - Šibenik
t. +385 22 312 999 f. +385 22 312 988
ncp@ncp.hr



ADRIA-MAR
BRODOGRADNJA d.o.o.

ADRIA-MAR BRODOGRADNJA

je tvrtka specijalizirana za projektiranje, gradnju i remont ratnih brodova i brodova specijalne namjene, te njihove pripadajuće opreme.

NAŠ USPJEH se temelji na pouzdanoj suradnji sa klijentima i kooperantima.

RASPOLAŽEMO

- visokoobrazovanim osobljem školovanim na CAD sustavima
- najnovijim referencama u ratnoj brodogradnji
- tehnologijom remonta sustava broskog naoružanja

AKTUALNI PROJEKTI NOVOGRADNJE



PV30-LS
Patrolni brod



OPB31
Patrolni brod



OPB39
Patrolni brod

GENERALNI REMONTI



Remont brodova klase LSTH



Generalni remont broda klase Zlatica



Generalni remont raketne topovnjače klase Combattente II G