

Mladen Radonić
Dr. sc. Roko Dejhalla
Tehnički fakultet u Rijeci
Vukovarska 58
51000 Rijeka

Stručni članak
UDK: 629.5.015.4
629.5.035:004
Primljeno: 1. listopada 2007.
Odobreno: 17. listopada 2007.

RAČUNALNI PROGRAM ZA ODREĐIVANJE GEOMETRIJSKIH I HIDRODINAMIČKIH ZNAČAJKI BRODSKOG VIJKA

U radu se razmatra izbor i optimizacija broskog vijka te je prikazan računalni program za određivanje geometrijskih i hidrodinamičkih značajki broskog vijka. Brodski vijak mora biti vrlo učinkovit, ne bi smio stvarati neželjene vibracije i buku te se naposljetku ne bi smjelo dopustiti erozijsko oštećenje uslijed kavitacije na krilima. Glavni zadatak projektanta jest pronaći ravnotežu između ovih zahtjeva. Početni pristup kod projekta broskog vijka uobičajeno se temelji na rezultatima ispitivanja slobodne vožnje sustavno mijenjanih nizova modela brodskih vijaka. Time su obuhvaćene promjene u nizu projektnih parametara kao što su broj krila, omjer uspona, površina krila i oblici presjeka. Brodski vijak koji odgovara značajkama određenog niza može se brzo projektirati kako bi odgovarao zahtijevanim projektnim uvjetima. Na temelju dobro poznatih polinoma B-sustavnog niza brodskih vijaka razvijen je računalni program «BroVi». Program se može uspješno koristiti za optimizaciju broskog vijka kao i za određivanje radne točke (broj okretaja, poriv, moment, snaga).

Ključne riječi: brodski vijak, B-sustavni niz modela vijaka, računalni program

1. UVOD

Brodski vijak spada među izuzetno važne dijelove broda te stoga projekt i izrada broskog vijka predstavlja vrlo odgovoran i zahtjevan zadatak. Projektant koji rješava problem broskog vijka odlučuje o obliku broskog vijka na način da vijak pri zadanom broju okretaja apsorbira određenu snagu i proizvodi poriv potreban da se brod kreće zahtijevanom brzinom. Brodski vijci moraju biti što učinkovitiji što znači da se snaga koju porivni stroj predaje vijku mora pretvoriti u snagu poriva uz što manje gubitaka. Uz to, vijak ne bi smio stvarati neželjene vibracije i buku. Naposljetku, potrebno je izbjegavati mogućnost oštećenja vijka zbog pojave kavitacije na krilima. Glavni zadatak projektanta jest pronaći ravnotežu između svih tih zahtjeva, te postići optimum oblika i dimenzija broskog vijka.

Podaci temeljeni na ispitivanju sustavnih nizova brodskih vijaka imaju izuzetnu vrijednost i predstavljaju osnovno sredstvo za projektiranje vijaka. Tijekom 20. stoljeća

osnovan je i ispitan veći broj nizova konvencionalnih brodskih vijaka, od kojih su najpoznatiji nizovi Froudea, Schaffrana, Taylora, Schoenherra, Gawna te Troosta [1]. Kasnije su osnovani i obrađeni nizovi tzv. nekonvencionalnih propulzora kao što su kontrarotirajući vijci, vijci u sapnici, vijci s krilima upravljivog uspona, cikloidni propulzori i dr.

Dijagrami slobodne vožnje proizašli iz ovih ispitivanja pružaju mogućnost relativno jednostavnog projektiranja brodskih vijaka uz manje napora uloženog u proračun. Zbog jednostavnosti korištenja njihova je važnost naročito velika pri preliminarnom određivanju glavnih značajki vijka (promjer, uspon, broj krila, omjer površina), dok se kasnije uvijek mogu provesti detaljniji proračuni u cilju bolje optimizacije projekta vijka.

2. ODREĐIVANJE ZNAČAJKI BRODSKOG VIJKA

Pojam odabira optimalnog vijka zapravo predstavlja problem odabira geometrijskih značajki vijka za koje će vijak imati najveći stupanj djelovanja η_o kod zadanih uvjeta rada [2]. Kod problema određivanja geometrijskih i hidrodinamičkih značajki brodskog vijka u praksi se u osnovi razlikuju optimizacija vijka kod koje postoje dva različita pristupa te analiza rada odabranog vijka:

- optimizacija vijka s tzv. «stajališta stroja», kada je zadana vrijednost momenta Q (odnosno snaga predana vijku P_D) te broj okretaja vijka n ili promjer D ,
- optimizacija vijka s tzv. «stajališta broda», kada je zadana vrijednost poriva T te promjer D ili broj okretaja n ,
- analiza rada odabranog vijka (zadana je geometrija: promjer D , uspon P , omjer površina A_E/A_O) pri čemu se određuju potrebne veličine n , P_D i stupanj djelovanja vijka η_o na način da vijak daje dovoljan poriv T potreban za savladavanje ukupnog otpora broda pri plovidbi zadanom brzinom.

Prethodno je potrebno izabrati broja krila vijka Z te na odgovarajući način odrediti vrijednosti brzine pritjecanja vode V_A i omjera površina A_E/A_O . Vrijednost omjera površina A_E/A_O ovisi o pojavi kavitacije na krilima vijka, a najmanji potrebni omjer raširene površine radi izbjegavanja kavitacije može se približno odrediti primjenom Kellerove metode [3]. Ova je metoda pogodna za primjenu za sve sustavne nizove vijaka, premda su za pojedine nizove razvijene zasebne metode za provjeru kavitacije.

3. SUSTAVNI NIZ MODELA BRODSKIH VIJAKA INSTITUTA MARIN

Jedan od najpoznatijih i najobimnije razrađenih sustavnih nizova brodskih vijaka predstavlja B-sustavni niz vijaka osnovan u institutu MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) u Nizozemskoj [5]. Niz se sastoji od 120 modela vijaka koji se međusobno razlikuju prema broju krila, omjeru površina i omjeru uspona. Rezultati ispitanog niza

omogućavaju preliminarno određivanje geometrijskih i hidrodinamičkih značajki brodskih vijaka za veliki broj projektnih zahtjeva koji se pojavljuju u praksi.

Tijekom proteklih desetljeća, budući da je postojalo više različitih izvora podataka i dijagrama slobodne vožnje B-sustavnog niza te zbog primjećених odstupanja vrijednosti među njima, pojavila se potreba za utvrđivanjem njihovih točnih vrijednosti. Usklađivanje je obavljeno primjenom metode višestruke regresijske analize. Proračunate vrijednosti poslužile su kao osnova za razvoj regresijskih polinoma koeficijenta poriva K_T i koeficijenta momenta K_Q [4]. Koeficijenti K_T i K_Q izraženi su u polinomnom obliku u ovisnosti od koeficijentu napredovanja J , omjeru uspona P/D , omjeru površina A_E/A_O , i broju krila Z . Osnovne vrijednosti dane su za vrijednosti Reynoldsovog broja od 2×10^6 , a kasnije su obavljene korekcije i za Reynoldsove brojeve od 2×10^7 , 2×10^8 i 2×10^9 . Polinomni izrazi dani su u obliku:

$$K_T = \Sigma [C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_O)^u \cdot (Z)^v]$$

$$K_Q = \Sigma [C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_O)^u \cdot (Z)^v].$$

Relevantni koeficijenti dani su u [4]. Polinomni izrazi omogućavaju numerički izračun vrijednosti tih koeficijenata.

4. RAČUNALNI PROGRAM «BroVi»

4.1. Općenito

Glavne zadaće računalnog programa «BroVi» sastoje se u određivanju geometrijskih i hidrodinamičkih značajki vijka grupiranih pod zajedničkim pojmom «Optimizacija», te određivanju hidrodinamičkih značajki brodskog vijka grupiranih pod pojmom «Analiza». Proračun se odnosi na konkretan projekt plovnog objekta, stoga je program koncipiran na način da su ponajprije definirane neke općenite značajke projekta broda, npr. naziv projekta, karakteristike vode i dr. (Slika 1.).

Slika 1. Obrazac za određivanje osnovnih programskih i projektnih postavki

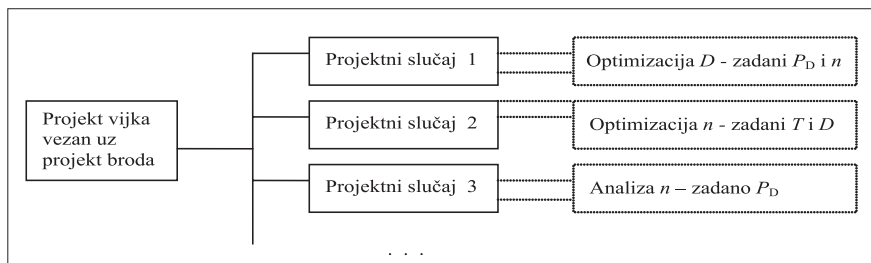
Računalni program uključuje mogućnost odabira jednog od četiri mogućih pristupa optimizaciji:

- proračun optimalnog D za zadane vrijednosti P_D i n ,
- proračun optimalnih n za zadane vrijednosti P_D i D ,
- proračun optimalnog D za zadane vrijednosti T i n ,
- proračun optimalnih n za zadane vrijednosti T i D ,

te jednog od dva moguća pristupa analizi:

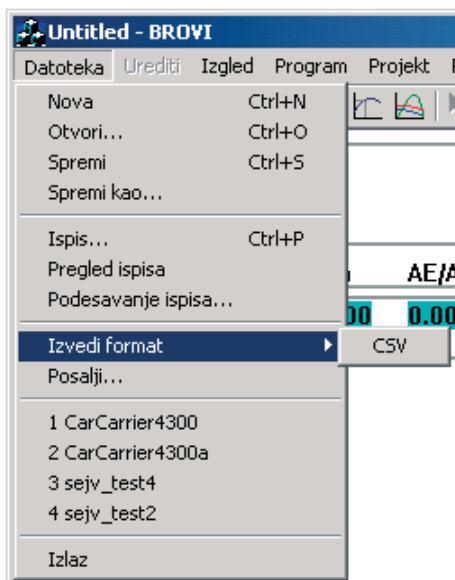
- proračun potrebnih n te odgovarajuće vrijednosti P_D za zadanu vrijednost T ,
- proračun potrebnih n te odgovarajuće vrijednosti T za zadanu vrijednost P_D .

U programu je pružena mogućnost definiranja različitih varijacija ulaznih veličina za pojedine projektne slučajeve kojih može po potrebi biti stvoren proizvoljan broj (Slika 2.). Kroz projektne slučajeve pružena je mogućnost jednostavne naknadne usporedbe rezultata proračuna bilo koje vrste u sklopu jedne projektne datoteke.



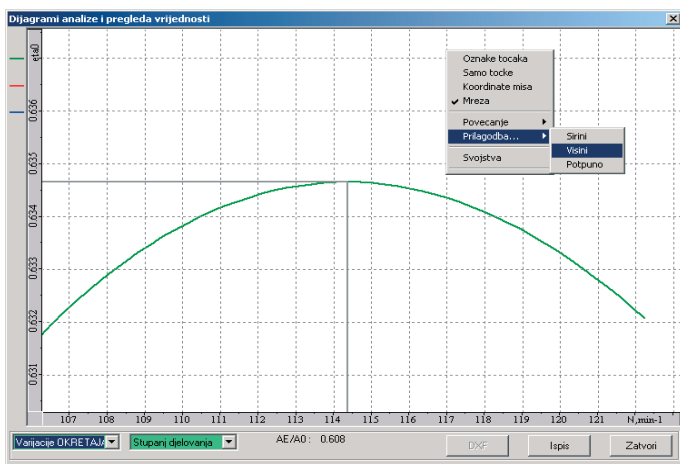
Slika 2. Shematski primjer strukture projektnih slučajeva unutar jednog projekta

Radi općenite primjenljivosti, računalni program ima i određene druge mogućnosti koje nisu izravno vezane uz sam proračun. Datotečne funkcije osnovne su funkcije gotovo svakog računalnog programa, a nalaze se sve u sklopu izbornika «Datoteka» koji je prikazan na slici 3. U padajućem izborniku «Datoteka» nalaze se sve prethodno navedene funkcije, kao i prečaci za otvaranje projektnih datoteka s kojima se radilo u posljednje vrijeme. Funkcije ispisa na pisač odnose se na ispis rezultata proračuna projektnih slučajeva u obliku sličnom onomu na radnom prostoru programa na ekranu. Funkcija ispisa liste projektnih slučajeva u neki od standardnih oblika u informatici omogućava kasniju obradu rezultata proračuna korištenjem bilo kojeg programskog alata (npr. Excel) koji prihvaća taj standardni oblik ispisa.

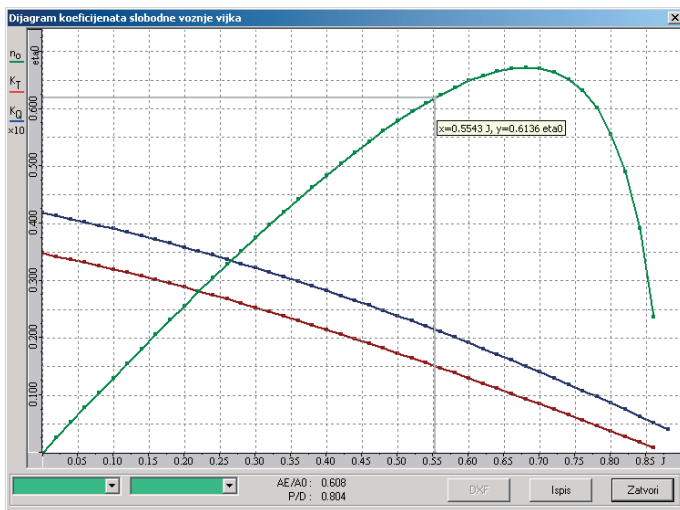


Slika 3. Izbornik «Datoteka»

Iz praktičnih razloga rezultati se mogu prikazati i dijagramski. Na raspolaganju je više dijagrama s rezultatima iz analize rada vijka kao što su η_o , T , P_D , η_o u funkciji n (Slika 4.) i P/D , η_o u funkciji D i omjera P/D te dijagram slobodne vožnje vijka (Slika 5.). Dodatno je ostavljena i mogućnost formiranja standardne, tj. «DXF» datoteke kojom je omogućena daljnja grafička obrada dijagrama.



Slika 4. Primjer dijagrama - stupanj djelovanja η_0 u funkciji različitih brzina vrtnje vijka n



Slika 5. Dijagram slobodne vožnje vijka

4.2. Optimizacija vijka za zadane uvjete

Optimizacija vijka jedna je od glavnih funkcija računalnog programa. Optimizacija predstavlja određivanje geometrijskih i hidrodinamičkih veličina vijka od kojih promjer vijka D može u pojedinim optimizacijskim pristupima biti i zadan, te ostalih veličina koje tada u potpunosti definiraju rad vijka (n , P_D , T). U tu svrhu se unutar programa variraju koeficijent napredovanja J te omjer uspona P/D . Posebnim se algoritmom (metoda bisekcije) vrši ubrzano približavanje što točnijoj vrijednosti za dane uvjete, ali tek u dovoljno kratkim

intervalima – toliko da se može očekivati dovoljna linearnost funkcije radi sigurnog konvergiranja konačnom rješenju. Odabire se, naposljetku, ona kombinacija veličina za koje je proračunati stupanj djelovanja vijka η_o najveći. Na slici 6. prikazan je izgled obrasca s vrijednostima ulaznih i izlaznih veličina proračuna optimizacije vijka. Optimizacija se može izvršavati na dva različita načina: automatski ili interaktivno. Način na koji će se odvijati proračuni optimizacije odabire se u obrascu «Postavke» zajedno s ostalim općenitim projektnim postavkama. Ovi se načini odnose na razinu utjecaja korisnika na tok proračuna vezano uz određivanje brzine napredovanja vijka V_A , odnosno minimalnog omjera površina A_E/A_O . Vrijednosti ovih dviju ulaznih veličina ujedno ovise o izračunatim vrijednostima nekih od ostalih veličina (npr. D) koje se nakon pojedinog proračuna mogu izmijeniti – što dovodi do iterativnog postupka pronalaženja približnog podudaranja vrijednosti svih ulaznih i proračunatih veličina. U automatskom načinu rada izračuni V_A i A_E/A_O , ukoliko nisu zadani, provode se nekom od ponuđenih empirijskih numeričkih metoda proračuna, a sam postupak je jednostavniji što se tiče korisnika. Interaktivni način rada nudi slobodu proračuna bilo kojem korisniku poznatom metodom ili unošenje iskustvene vrijednosti, što može dati točnije ukupne rezultate proračuna, ali je time postupak naravno nešto složeniji budući da zahtijeva više intervencija korisnika.



The screenshot shows a software window titled "CarCarrier4300 - BROVI". The menu bar includes "Datoteka", "Uredi", "Izgled", "Program", "Projekt", and "Pomoc". The toolbar contains icons for file operations and help. The main area displays project information: "Projekt: Car-Truck Carrier 4300 / Radonic" and "Kont.br.: 0001/07". A date "06/17/07" is shown in the top right. Below this is a table with 10 columns: Va,m/s, D,m, P,m, AE/A0, N,1/s, T,kN, Pd,kW, eta0, and V.P. Two rows of data are shown, with the second row highlighted in blue.

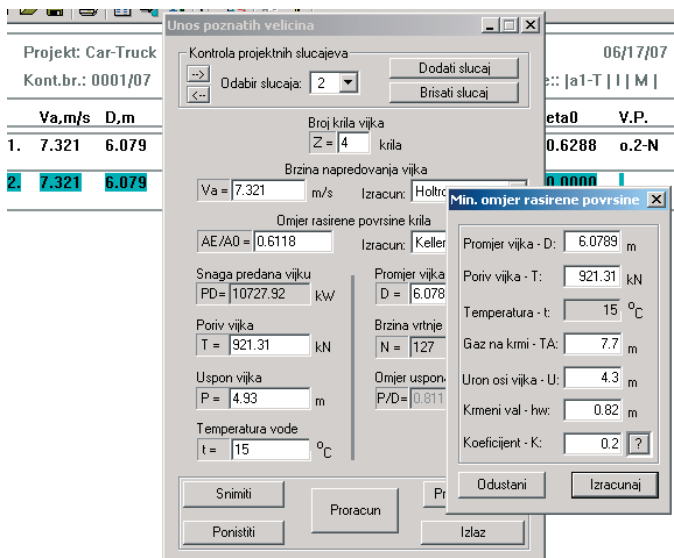
	Va,m/s	D,m	P,m	AE/A0	N,1/s	T,kN	Pd,kW	eta0	V.P.
1.	7.321	6.079	4.930	0.612	127.00	921.3	10727.9	0.6288	0.2-N
2.	7.321	6.079	4.930	0.612	130.23	1009.7	11933.5	0.6194	0.1-T

Slika 6. Tablični prikaz proračunatih vrijednosti iz optimizacije

4.3. Analiza rada odabranog vijka

Postupak analize rada vijka provodi se s poznatim vrijednostima svih veličina koje u potpunosti određuju geometriju vijka, te ostalih veličina ovisno o pojedinom pristupu proračunu analize. Manipulacija projektnim slučajevima jednaka je kao i za optimizaciju, te se jednako tako može provesti analiza za slučaj u kojem su vrijednosti veličina prethodno određene nekim od postupka optimizacije i obrnuto. Analiza rada vijka provodi se jednodimenzijским pretraživanjem u petlji varijacije vrijednosti koeficijenta napredovanja J , dok je vrijednost omjera uspona P/D u ovom slučaju jednoznačno određena budući da je geometrija vijka zadana. Ta se činjenica očituje u osjetno većoj brzini proračuna u odnosu na postupke optimizacije. Druga se razlika sastoji u tome što postupci analize rade jedino u interaktivnom načinu rada budući da je omjer površina zadan kao jedna od geometrijskih značajki vijka pa automatski način rada nema smisla kod analize. Projektant pomoću vrijednosti dobivenih

proračunom analize (Slika 7.), može ocijeniti da li projekt vijka zadovoljava zahtjevane uvjete, da li motor ima dovoljno rezerve snage i sl. Daljnji uvid i analize rada vijka mogući su uz pomoć dijagrama kojima se pristupa putem izbornika «Projekt» ili jednostavnije iz alatne trake (, ).



Projekt: Car-Truck
Kont.br.: 0001/07

	Va,m/s	D,m
1.	7.321	6.079
2.	7.321	6.079

Unos poznatih velicina

Kontrola projektnih slučajeva

Odabir slučaja: 2

Broj kila vijka
Z = 4 kila

Brzina napredovanja vijka
Va = 7.321 m/s

Omjer rasirene površine kila
AE/A0 = 0.6118

Snaga predana vijku
PD = 10727.92 kW

Poriv vijka
T = 921.31 kN

Uspón vijka
P = 4.93 m

Temperatura vode
t = 15 °C

Min. omjer rasirene površine

Promjer vijka - D: 6.0789 m

Poriv vijka - T: 921.31 kN

Temperatura - t: 15 °C

Gaz na krmu - TA: 7.7 m

Uron osi vijka - U: 4.3 m

Krmeni val - hw: 0.82 m

Koeficijent - K: 0.2

Slika 7. Tablični prikaz proračunatih vrijednosti iz analize

5. ZAKLJUČAK

Na tržištu danas postoje razni programski paketi koji pružaju djelomičnu ili cjelovitu pomoć kod određivanja geometrijskih i hidrodinamičkih značajki broskog vijka. Ti su usko specijalizirani programi relativno skupi, budući da su namijenjeni ograničenom krugu korisnika tako da se nerijetko korisnik, ukoliko ima dovoljno znanja iz programiranja računala, odlučuje za samostalnu izradu računalnog programa, proizvoljne složenosti i mogućnosti u skladu s vlastitim potrebama.

Računalni program «BroVi» je univerzalno primjenjivo programsko rješenje za određivanje geometrijskih i hidrodinamičkih značajki uobičajenih vijaka plovnih objekata. Uz osnovne mogućnosti definirane njegovom namjenom, program sadrži i nekoliko sporednih funkcija. One su uvedene kako bi se olakšao rad i dao bolji uvid u rezultate proračuna (npr. različite vrste dijagrama) kako bi se pokušalo što bolje zaokružiti cjelovitost programskog rješenja za projektiranje broskog vijka. Naravno, brojne se još mogućnosti otvaraju za eventualno proširenje funkcionalnosti programa.

LITERATURA

- [1] Carlton, J. S., *Marine Propellers & Propulsion*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 1994.
- [2] Daidola, J. C., F. M. Johnson, *Propeller Selection and Optimization*», Hampton Roads Section, SNAME, 1992.
- [3] *Principles of Naval Architecture, Vol. II., Resistance, Propulsion and Vibration*, Jersey City, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [4] Oosterveld, M. W. C., P. van Oosanen, *Further Computer-Analysed Data of the Wageningen B-Screw Series*, *International Shipbuilding Progress*, 22(1975), br. 251.
- [5] Lammeren, W. P. A. van, J. D. van Manen, M. W. C. Oosterveld, *The Wageningen B-Screw Series*, *Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 77(1969).

COMPUTER-BASED PROGRAMME FOR DEFINING THE GEOMETRIC AND HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MARINE PROPELLER

SUMMARY

The paper aims at analyzing the selection and optimization of a marine propeller and at presenting the computer-based programme for defining the geometric and hydrodynamic characteristics of a marine propeller. A marine propeller must be efficient, should not cause unintended vibrations and noise, and the erosive damage due to cavitation on wings should not be tolerated as well. The main task of a designer is to keep the balance between these requirements. The initial approach to the marine propeller design is usually based on the results obtained from the B-screw series free run tests. This includes the changes in a number of design parameters such as the number of wings, the propeller pitch ratio, the wing area and the section types. The marine propeller that meets the characteristics of the particular screw series can be easily designed in order to meet the demanding design standards. Based on the well known B-screw series polynomials, a computer-based programme „BroVi“ has been created. This programme can be successfully used for the marine propeller optimization and in determining the working point (revolution number, propeller thrust, propeller torque, propulsive power).

Key words: *marine propeller, B-screw series, computer-based programme*

Mladen Radonić

Roko Dejhalla, Ph. D.

Faculty of engineering

Vukovarska 58

51000 Rijeka

Croatia