

Denis TOMIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, tomich.denis@gmail.com

Nastia DEGIULI, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, nastia.degiuli@fsb.hr

PRIBLIŽNA METODA PRORAČUNA UKUPNOG OTPORA GLISERA

Sažetak

U radu su opisani problemi određivanja ukupnog otpora glisirajućih formi u mirnoj vodi te načini određivanja ukupnog otpora istih. Pored rezultata modelskih ispitivanja najčešći načini su upotreba približnih proračuna ukupnog otpora glisera. Izrađen je programski alat za proračun ukupnog otpora i trima glisirajućih formi u programu excel. Programski alat se temelji na matematičkom modelu koji je razvio profesor Radojčić za proračun otpora, trima, oplakane površine i duljine oplakane površine glisirajućih formi primjenom regresijske analize na rezultate ispitivanja sistematskih Serija 62. Matematički model je funkcija četiri parametra trupa i opterećenja (parametar opterećenja, omjer duljine i širine zgiba, uzdužni položaj težišta mase i kut nagiba dna). Alat omogućuje brzi proračun ukupnog otpora i trima na osnovu ulaznih parametara glisirajućih formi u svrhu odabira najboljeg projekta u fazi predprojekta. Izrađeni alat je testiran na dostupnim eksperimentalnim podacima iz literature.

Ključne riječi: gliser, ukupni otpor, trim, oplakana površina, regresijska analiza

AN APPROXIMATE METHOD FOR TOTAL RESISTANCE CALCULATION OF THE PLANING HULLS

Abstract

The paper describes the problems and approaches to determining the total resistance of planing hulls in calm water. In addition to the results of model tests the most common ways for predicting the total resistance are approximate calculations of the total resistance of a planing hull. For this purpose the software tool for calculation of the total resistance and trim of planing hulls has been made in excel program. The software tool is based on a mathematical model developed by professor Radojčić for calculation of the total resistance, trim, wetted surface and the length of wetted surface of planing hulls established by regression analysis of data of systematic Series 62. The mathematical model is a function of four hull form and loading parameters (loading coefficient, ratio of length to beam, longitudinal center of gravity location and deadrise angle). The tool allows fast calculation of the total resistance and trim on the basis of input parameters of planing hulls in order to select the best project in the early stage of ship design. The software tool has been tested on available experimental data from the literature.

Key words: planing hull, total resistance, trim, wetted surface, regression analysis

1. Uvod

Težina broda bilo u stanju mirovanja ili gibanja je uravnotežena tlakom koji djeluje na oplakanu površinu broda. Taj tlak se sastoji od dvije komponente: hidrostatički tlak koji je povezan s uzgonom i hidrodinamički tlak koji je povezan sa brzinom broda. Općenito, kada je Froudeov broj $Fr \leq 0,4$ hidrostatički tlak je bitno veći od hidrodinamičkog tlaka. Brodovi koji plove u ovom području brzina nazivaju se deplasmanski brodovi. Kada je Froudeov broj u rasponu $0,4 - 0,5 \leq Fr \leq 1,0 - 1,2$ hidrostatički i hidrodinamički tlak su istog reda veličine, te se brodovi koji plove u ovom području brzina nazivaju se poludeplasmanski brodovi. Kada je Froudeov broj $Fr > 1,0 - 1,2$, hidrostatički tlak je bitno manji od hidrodinamičkog, te se brodovi koji plove u ovom području brzina nazivaju gliseri [1].

Na slici 1. se može vidjeti primjer djelovanja sila na trup glisirajućeg plovila [2].

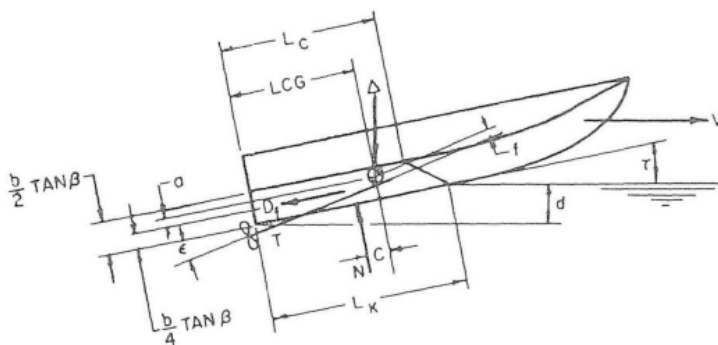


Fig. 1. Impact of forces on ship hull [4]

Slika 1. Djelovanje sila na trup glisera [4]

Hidrodinamičke i hidrostatske sile tlaka mijenjaju se s Froudeovim brojem. Ovakva podjela nije prikladna s obzirom da duljina vodne linije nije konstantna veličina i nepoznata je za poludeplasmanske i gliserske brodove. Taj problem je prevaziđen uvođenjem u izraz za Froudeov broj druge karakteristične dimenzije broda $\nabla^{1/3}$. S eksperimentalnog stajališta glisiranje je potpuno razvijeno pri $Fr_{\nabla} > 5$, s tim da se $Fr_{\nabla} \geq 3$ uzima kao donja granica glisiranja.

Osim modelskih ispitivanja, otpor golog glisirajućeg trupa u mirnoj vodi može se odrediti na slijedeća dva načina: pomoću empirijskih jednadžbi među kojima su najčešće u upotrebi one od Savitskyog te primjenom rezultata ispitivanja sistematskih serija.

U radu [3] razvijen je matematički model za proračun otpora, trima, oplakane površine i duljine oplakane površine glisirajućih formi primjenom regresijske analize na rezultate ispitivanja sistemskih serija. Svrha korištenja matematičkog modela je omogućiti projektantu brzu procjenu ukupnog otpora i trima i provesti parametarsku studiju glisirajućih formi u fazi predprojekta, te na osnovu dobivenih rezultata izabrati najbolju varijantu između razmatranih.

Cilj ovog rada je provjera matematičkog modela danog u [3] u svrhu analize ukupnog otpora i trima glisera. Rezultati regresijske analize dani u obliku dijagrama [3] i aproksimirani su polinomom petog stupanja, te je na osnovu predloženog matematičkog modela izrađen proračun ukupnog otpora i trima u programu Excel. Rezultati dobiveni proračunom uspoređeni su s dostupnim rezultatima ispitivanja modela [4].

2. Približna metoda za proračun otpora i trima

Radojčić je u svom radu [3] predložio matematički model za predviđanje otpora i kuta trima za goli trup glisirajućih formi. Metoda se odnosi na raspon Froudeovih brojeva od 1,0 do 3,50 za otpor, te za raspon Froudeovih brojeva od 1,0 do 4,0 za kut trima. Metoda se temelji na regresijskoj

analizi podataka sistematske serije 62 s kutom nagiba dna od $12,5^\circ$ i 25° i serije 65. Predloženi matematički model je funkcija četiri parametra trupa i opterećenja (koeficijent opterećenja (koeficijent površine), omjer duljine i širine, uzdužni položaj težišta, kut nagiba dna) i presjeka trupa. Metoda omogućava predviđanje otpora glisirajućih formi u predprojektnoj fazi.

2.1. Serija 62

Ova serija je razvijena u ranim 1960-im, a temelji se na rasponu brzina glisirajućeg režima. Glavne karakteristike forme su usko zrcalo, tupi (*eng. blunt*) pramac i maksimalna širina zgiba ispred glavnog rebra. Ova serija je ispitana za male kutove nagiba dna $\beta_x = 13^\circ$. Modelska ispitivanja su izvršena za različite raspone brzina, stanja krcanja i uzdužnog položaja težišta istisnine. Primjerena je i jednostavna za korištenje pri malim kutovima nagiba dna. Nedostatak je da tupi pramac može rezultirati velikom silom trenja.

Sistematska serija 62 je serija glisirajućih formi sa jednim zgibom. Slika 2. prikazuje formu serije 62, [5].

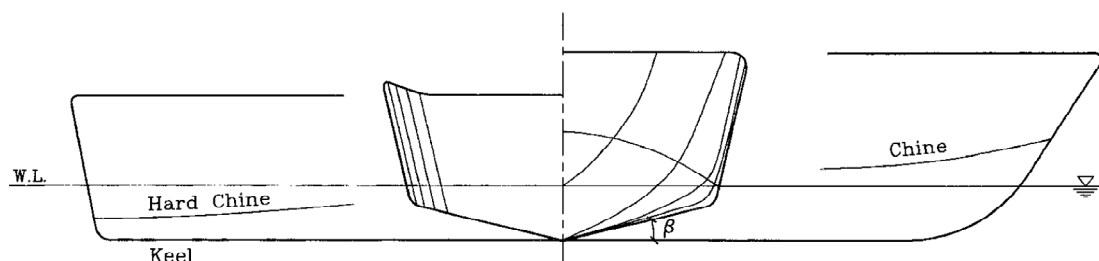


Fig. 2. Planning hull form series 62

Slika 2. Glisirajuća forma serija 62

2.2. Parametri forme i opterećenja koji su korišteni u analizi

U metodi su uzeta u obzir četiri parametra trupa i opterećenja [3], a to su redom:

- $\frac{A_p}{\nabla^{2/3}}$ - koeficijent opterećenja (koeficijent površine),
- $\frac{L_p}{B_{pa}}$ - omjer projiciranja duljine zgiba i srednje širine zgiba,
- $\frac{100LCG}{L_p}$ - omjer uzdužnog položaja težišta (mjenog od zrcala krme) i projicirane duljine zgiba,
- β_x - kut nagiba dna na 50% duljine L_p .

Serija DTMB (David Taylor Model Basin) koja je ispitana na DUT (Delft University of Technology) pokriva određene raspone brzina i parametara trupa [3] prikazanih u tablici 1.

Projicirana duljina zgiba L_p i maksimalna širina zgiba B_{px} su prikazani na Slici 3., dok se projicirana površina glisiranja A_p radi praktičnih razloga može pretpostaviti da je jednaka površini vodne linije pri mirovanju. Istisnina ∇ se uzima u stanju mirovanja.

Radojčić je proveo regresijsku analizu podataka o otporu serije 62, te je kasnije proširio i na neke modele serije 65. U ovom radu će se analizirati samo sistematska glisirajuća serija 62.

Podatci o ukupnom otporu su prikazani u obliku:

$$\frac{R_T}{\Delta} = f \left(\frac{A_p}{\frac{2}{\nabla^3}}, \frac{L_p}{B_{pa}}, \frac{LCG}{L_p}, \beta_x \right) \quad (1)$$

pri brzinama od: $Fr_{\nabla} = 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5$.

Table 3. Froude number and form parameters ranges

Tablica 1. Rasponi Froudeovih brojeva i parametara forme

Froudeov broj Fr_{∇}	1,0 – 3,50
Omjer duljine i širine $\frac{L_p}{B_{pa}}$	2,36 – 6,72
Koeficijent opterećenja $\frac{A_p}{\nabla^{2/3}}$	4,25 – 9,50
Položaj težišta istisnine $\frac{100LCG}{L_p}$	30% – 44,3%
Kut nagiba dna na 50% L_p β_x	13,0° – 37,4°

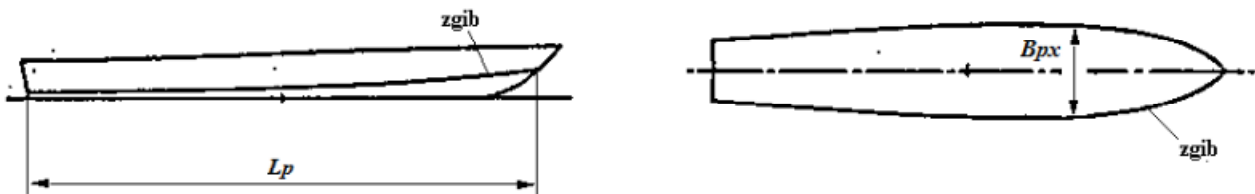


Fig. 3. Projected chine length and maximum breadth over chines

Slika 3. Projicirana duljina zgiba i maksimalna širina zgiba

Rasponi parametara za koje je metoda primjenjiva prikazani su u tablici 1. Analizom formi trupa serije 62 pokazano je da odnos maksimalne i srednje širine zgiba B_{px}/B_{pa} varira u rasponu od 1,18 do 1,22, te se za preliminarni proračun tj. u predprojektu uzima vrijednost omjera $B_{px}/B_{pa} = 1,21$ [5].

2.3. Matematički model regresijske analize

Matematički model koji opisuje ova četiri parametra je polinomska jednadžba koja poprima isti oblik za sve parametre. Radojčić je istraživao ostale matematičke modele, te je došao do zaključka da nema dovoljno razloga da se predloženi polinomski model odbaci. U ovom radu je također korišten predloženi polinom [3].

Navedeni polinom se sastoji od 27 članova od kojih su četiri osnovna člana te se temelje na početnim parametrima trupa i opterećenja, dok su ostali dobiveni kombiniranjem istih i množenjem s pripadajućim regresijskim koeficijentima kako slijedi:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_8x_8 + b_9x_9 + b_{10}x_{10} + \\ + b_{11}x_{11} + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{14}x_{14} + b_{15}x_{15} + b_{16}x_{16} + b_{17}x_{17} + b_{18}x_{18} + b_{19}x_{19} + \\ + b_{20}x_{20} + b_{21}x_{21} + b_{22}x_{22} + b_{23}x_{23} + b_{24}x_{24} + b_{25}x_{25} + b_{26}x_{26} \quad (2)$$

gdje je $Y = \tau$ (s pripadajućim regresijskim koeficijentima "a"), $Y = R_T/\Delta$ (s pripadajućim regresijskim koeficijentima "b"), $Y = S/\nabla^{2/3}$ (s pripadajućim regresijskim koeficijentima "c") i $Y = L/L_p$ (s pripadajućim regresijskim koeficijentima "d"). Regresijski koeficijenti a , b , c i d za Froudeove brojeve $Fr_{\nabla} = 1,0; 1,25; 1,50; 1,75; 2,0; 2,50; 3,0; 3,50$ dani su u [3].

Osnovna četiri parametra trupa u novi set varijabli x_1 , x_2 , x_3 i x_4 koji poprimaju vrijednosti od -1 do 1. Ove nove varijable su nadalje korištene u analizi i vrijede za proračun otpora, trima, oplakane površine i duljine oplakane površine i prikazane su sljedećim jednadžbama [3]:

$$x_1 = \frac{(A_p/\nabla^{2/3} - 6,875)}{2,625} \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{(100LCG/L_p - 37,4)}{7,4} \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{(L_p/B_{pa} - 4,545)}{2,185} \quad (5)$$

$$x_4 = \frac{(\beta_x - 25,2)}{12,2} \quad (6)$$

Varijable x_5 do x_{26} su dobivene kao kombinacija osnovna četiri parametra, te poprimaju jednake vrijednosti za proračun otpora, trima, oplakane površine i duljine oplakane površine. Varijable x_5 do x_{26} su dane u tablici 2. [5].

Table 2. Regression analysis variables

Tablica 2. Varijable regresijske analize

$x_5 = x_1x_2$	$x_{13} = x_3^2$	$x_{21} = x_3x_1^2$
$x_6 = x_1x_3$	$x_{14} = x_4^2$	$x_{22} = x_3x_2^2$
$x_7 = x_1x_4$	$x_{15} = x_1x_2^2$	$x_{23} = x_3x_4^2$
$x_8 = x_2x_3$	$x_{16} = x_1x_3^2$	$x_{24} = x_4x_1^2$
$x_9 = x_2x_4$	$x_{17} = x_1x_4^2$	$x_{25} = x_4x_2^2$
$x_{10} = x_3x_4$	$x_{18} = x_2x_1^2$	$x_{26} = x_4x_3^2$
$x_{11} = x_1^2$	$x_{19} = x_2x_3^2$	
$x_{12} = x_2^2$	$x_{20} = x_2x_4^2$	

2.4. Ograničenja pri primjeni modela

Matematički model može služiti samo za predviđanje karakteristika novog glisirajućeg trupa čije su karakteristike i parametri slični onima koji su uzeti u obzir za izradu matematičkog modela.

Ostale karakteristike i parametri koji nisu korišteni tijekom izrade matematičkog modela također trebaju biti u granicama koje su dane u tablicama 3. i 4. [3]. Novi projekt može imati bilo koju kombinaciju karakteristika i parametara trupa, koji su korišteni pri izradi matematičkog modela što je u konačnici najvažnija karakteristika regresijske analize.

Tijekom izrade matematičkog modela korišteno je 15 modela različitih serija 62. U tablicama 3. i 4. dane su karakteristike dviju sistematskih serija 62, i to serije TMB 62 i serije 62-DUT.

Table 3. Hull characteristics of series TMB 62 models [3]

Tablica 3. Karakteristike trupa modela serije TMB 62 [3]

model	L_p , m	A_p , m ²	B_{pa} , m	B_{pt} , m	B_{px} , m	$\frac{L_p}{B_{pa}}$	$\frac{L_p}{B_{px}}$	$\frac{B_{px}}{B_{pa}}$	$\frac{B_{pt}}{B_{px}}$	$\frac{A_p}{L_p}$, m	β_x , °	β_t , °
4665	1,1924	0,6011	0,5041	0,4770	0,5962	2,36	2,00	1,18	0,80	0,475	13,0	12,5
4666	1,8248	0,9030	0,4947	0,4225	0,5962	3,69	3,06	1,21	0,71	0,482	13,0	12,5
4667-1	2,4384	1,1892	0,4877	0,3810	0,5962	5,00	4,09	1,22	0,64	0,488	13,0	12,5
4668	2,4384	0,8844	0,3627	0,2847	0,4435	6,72	5,50	1,22	0,64	0,488	13,0	12,5

Table 4. Hull characteristics of series 62-DUT models [3]

Tablica 4. Karakteristike trupa modela serije 62-DUT [3]

model	L_p , m	A_p , m ²	B_{pa} , m	B_{pt} , m	B_{px} , m	$\frac{L_p}{B_{pa}}$	$\frac{L_p}{B_{px}}$	$\frac{B_{px}}{B_{pa}}$	$\frac{B_{pt}}{B_{px}}$	$\frac{A_p}{L_p}$, m	β_x , °	β_t , °
186	1,00	0,4297	0,4297	0,40	0,50	2,37	2,00	1,16	0,80	0,471	25,0	25,0
187	1,25	0,4277	0,3422	0,29	0,4080	3,65	3,06	1,19	0,71	0,479	25,0	25,0
188	1,50	0,45	0,30	0,2350	0,3670	5,00	4,09	1,22	0,64	0,488	25,0	25,0
189	1,50	0,3347	0,2230	0,1750	0,2730	6,73	5,49	1,22	0,64	0,488	25,0	25,0

3. Kontrola matematičkog modela

Kontrola matematičkog modela je izvršena usporedbom dobivenih rezultata s rezultatima modelskih ispitivanja dostupnih u literaturi [4]. Izabrana su dva modela, te za svaki od modela po tri ispitivanja. Tijekom ispitivanja mijenjala se masa modela Δ i položaj uzdužnog težišta mase LCG .

Izabrani su sljedeći modeli:

- Model 4665 pokus 7, pokus 11 i pokus 12,
- Model 4666 pokus 1, pokus 8 i pokus 15.

Na slikama 4.- 6. prikazane su krivulje ukupnog otpora dobivene proračunom i modelskim ispitivanjima za model 4665, pokuse 7, 11 i 12. Na slikama 7.- 9. prikazane su krivulje ukupnog otpora dobivene proračunom i modelskim ispitivanjima za model 4666, pokuse 1, 8 i 15.

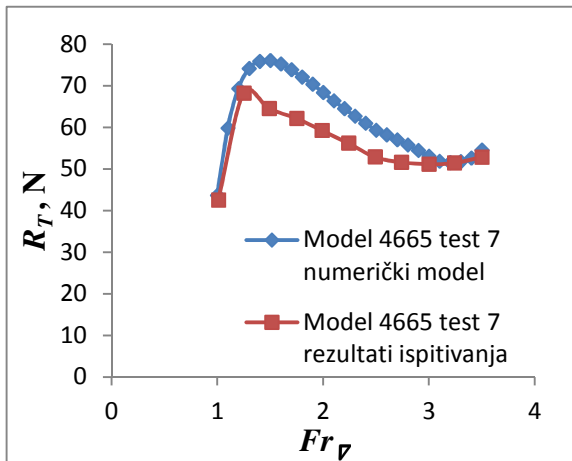


Fig. 4. Comparison of resistance curves for model 4665, exp. 7
Slika 4. Usporedba krivulja otpora za model 4665, pokus 7

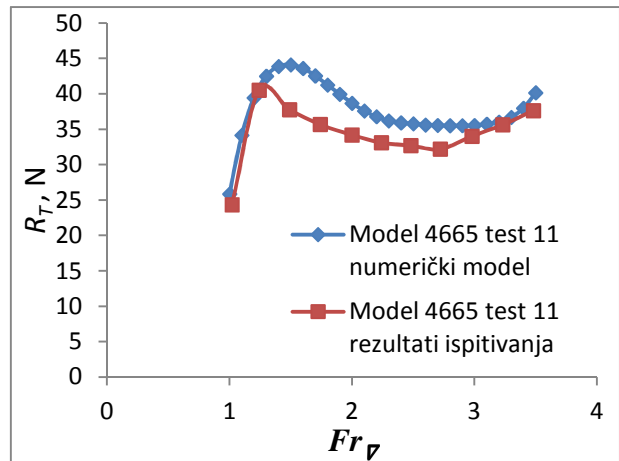


Fig. 5. Comparison of resistance curves for model 4665, exp. 11
Slika 5. Usporedba krivulja otpora za model 4665, pokus 11

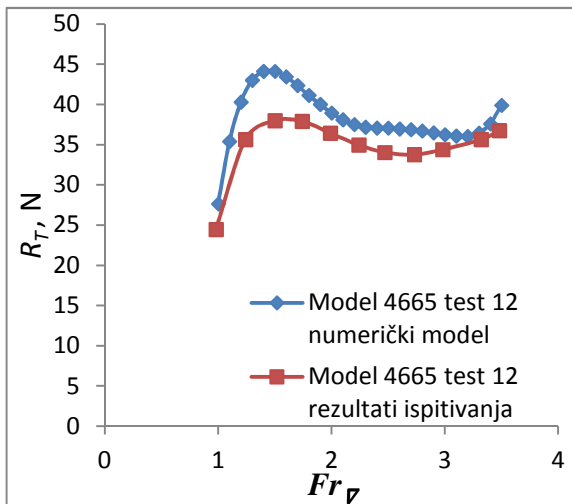


Fig. 6. Comparison of resistance curves for model 4665, exp. 12
Slika 6. Usporedba krivulja otpora za model 4665, pokus 12

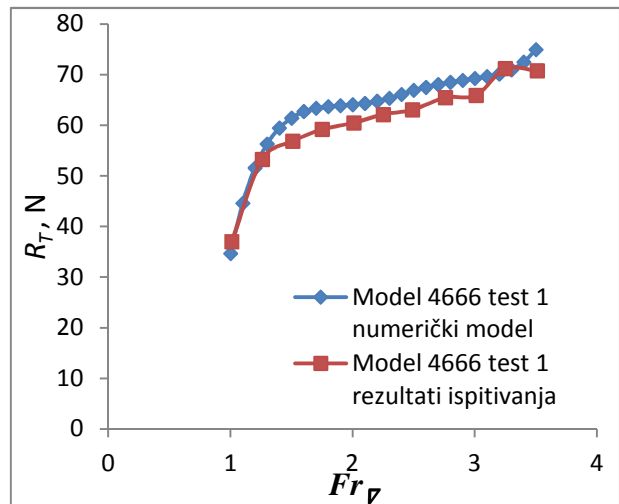


Fig. 7. Comparison of resistance curves for model 4666, exp. 1
Slika 7. Usporedba krivulja otpora za model 4666, pokus 1

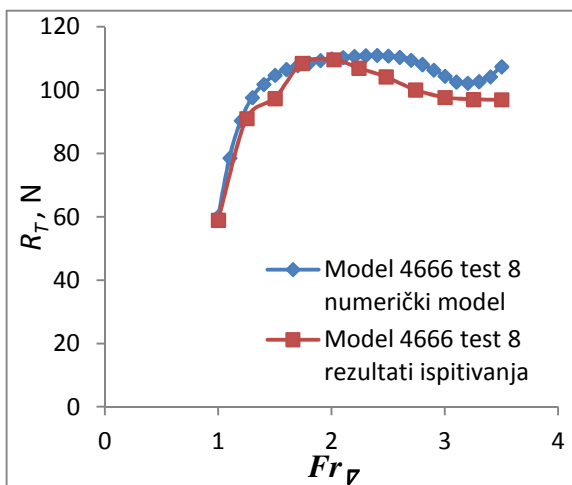


Fig. 8. Comparison of resistance curves for model 4666, exp. 8
Slika 8. Usporedba krivulja otpora za model 4666, pokus 8

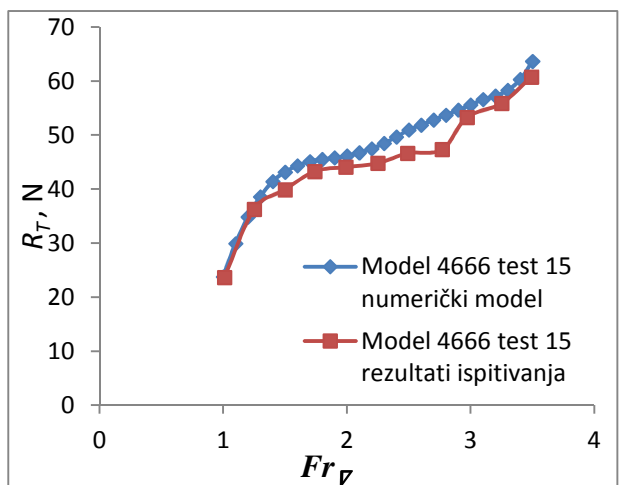


Fig. 9. Comparison of resistance curves for model 4666, exp. 15
Slika 9. Usporedba krivulja otpora za model 4666, pokus 15

Krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima i matematičkim modelom prema [3] imaju isti trend na cijelom interesantnom rasponu Froudeovih brojeva. Kao što je već rečeno metoda vrijedi za raspon Froudeovih brojeva $1,0 \leq Fr_{\nabla} \leq 3,50$.

Relativne greške rezultata ukupnog otpora dobivenih matematičkim modelom i modelskim ispitivanjima prikazane su u tablici 5. Vrijednosti ukupnog otpora za modelska ispitivanja pri Froudeovim brojevima 1; 1,5; 2; 2,5; 3 i 3,5 dobivene su linearnom interpolacijom kako slijedi:

$$R_T = R_{Tmax} + \frac{(R_{Tmax} - R_{Tmin})}{(Fr_{\nabla max} - Fr_{\nabla min})} (Fr_{\nabla} - Fr_{\nabla min}) \quad (7)$$

gdje je:

- R_T - ukupni otpor za traženi Froudeov broj,
- R_{Tmax} - gornja vrijednost ukupnog otpora,
- R_{Tmin} - donja vrijednost ukupnog otpora,
- $Fr_{\nabla max}$ - gornja vrijednost Froudeovog,
- $Fr_{\nabla min}$ - donja vrijednost Froudeovog.

Table 5. Relative errors of the total resistance values

Tablica 5. Relativne greške vrijednosti ukupnog otpora

	Relativna prosječna pogreška, %					
	$Fr_{\nabla} = 1,0$	$Fr_{\nabla} = 1,5$	$Fr_{\nabla} = 2,0$	$Fr_{\nabla} = 2,5$	$Fr_{\nabla} = 3,0$	$Fr_{\nabla} = 3,5$
Model 4665 test 7	5,71	18,04	15,57	12,22	3,72	3,25
Model 4665 test 11	9,14	16,16	7,07	9,03	5,19	8,12
Model 4665 test 12	9,15	16,16	7,07	9,04	5,19	8,13
Model 4666 test 1	-4,36	8,34	5,98	5,94	6,71	5,88
Model 4666 test 8	2,06	7,49	0,3	6,65	6,87	10,73
Model 4666 test 15	1,37	8,1	4,69	9,21	3,77	4,48

Kao što je vidljivo iz tablice 5. najveće greške se pojavljuju pri Froudeovom broju $Fr_{\nabla} = 1,5$, osim kod modela 4666, pokus 8 gdje se najveća relativna greška javlja pri Froudeovom broju $Fr_{\nabla} = 3,5$. Jedan od razloga ovako velike relativne greške bi mogao biti neprovedenost glađenja krivulje ukupnog otpora nakon izvršenog modelskog ispitivanja. Naime krivulja otpora modelskih ispitivanja napravljena je u programu Excel izravno iz vrijednosti modelskih ispitivanja danih u tablicama [4]. Također pri izradi matematičkog modela korišten je korelacijski dodatak $C_A = 0$ dok kod modelskih ispitivanja iznos korelacijskog dodatka nije poznat.

Pri izradi matematičkog modela korišten je relativno mali korak za Froudeov broj od 0,1. Kod modelskih ispitivanja korak Froudeovog broja je relativno veći za isti raspon. To je još jedan od razloga koji bi mogao utjecati na konačne rezultate.

Za modele manjih masa Δ i uzdužnog položaja težišta mase LCG pomaknutog više prema krmu za modele 4665 pokus 7, pokus 11 i pokus 12 matematičkim modelom dobivaju se rezultati ukupnog otpora s pripadajućom relativnom greškom od 18,04%, 16,16% i 16,16% pri Froudeovom

broju $Fr_{\nabla} = 1,5$. Kod modela većih masa Δ i uzdužnog položaja težišta mase LCG pomaknutog više prema pramcu odnosno model 4666 pokus 1, pokus 8 i pokus 15 najveća relativna greška se pojavljuje pri različitim Froudeovim brojevima.

Table 6. Relative average error

Tablica 6. Relativna prosječna greška.

	Relativna prosječna greška, %
Model 4665 pokus 7	9,75
Model 4665 pokus 11	9,12
Model 4665 pokus 12	9,12
Model 4666 pokus 1	4,75
Model 4666 pokus 8	5,68
Model 4666 pokus 15	5,27

U tablici 6. Prikazane su relativne prosječne greške po pojedinim modelima i pokusima. Važno je napomenuti da su relativne prosječne greške izračunate samo za određene Froudeove brojeve na osnovu podataka iz tablice 5. Iz tablice 6. se može vidjeti da je maksimalna relativna prosječna iznosi do 9,75% za model 4665, dok kod modela 4666 ta greška iznosi do 5,68%.

4. Zaključak

Postoji više načina procjene ukupnog otpora i trima glisirajućih formi već u fazi predprojekta. Poznavanje ukupnog otpora u fazi predprojekta je jedan od važnijih čimbenika pri projektiranju broda. Ukoliko na raspolaganju imamo matematički model koji omogućuje brzu procjenu ukupnog otpora i trima, moguće je među razmatranim projektima odabrati najpovoljniji sa stajališta ukupnog otpora.

Matematički model korišten u ovom radu temelji se na matematičkom modelu Radojčića [3] i proveden je u programu Excel Microsoftovog paketa te je usporedbom dobivenih rezultata ukupnog otpora sa dostupnim eksperimentalnim rezultatima ispitivanja [4] pokazano da maksimalne relativne greške matematičkog modela za svih šest pokusa iznose do 10%. Od pet modela koji su ispitani [4] samo dva modela su zadovoljila ulazne parametre predloženog matematičkog modela te se na osnovu njih validirao predloženi matematički model za proračun ukupnog otpora. Za ta dva modela koja su zadovoljila ulazne parametre matematičkog modela odabrana su po tri različita pokusa. Za svaki pokus modela varirana je masa modela Δ i uzdužni položaj težišta mase LCG . Budući da je matematičkim modelom zadan raspon Froudeovih brojeva $Fr_{\nabla} = 1,5 - 3,5$ za koji model vrijedi, iz rezultata modelskih ispitivanja izrađena je krivulja ukupnog otpora za taj raspon Froudeovih brojeva.

Rezultati proračuna ukupnog otpora primjenom matematičkog modela za svih šest pokusa pokazuju relativno dobro poklapanje trenda krivulje ukupnog otpora s rezultatima modelskih ispitivanja.

U tablici 6. prikazane su relativne prosječne greške po pojedinim modelima i pokusima. Važno je napomenuti da su relativne prosječne greške izračunate samo za određene Froudeove brojeve na osnovu podataka iz tablice 5. Iz tablice 6. se može vidjeti da je maksimalna relativna prosječna iznosi do 9,75% za model 4665, dok kod modela 4666 ta greška iznosi do 5,68%. Razlog

relativne greške vjerojatno leži u nedostatku glađenja krivulje ukupnog otpora nakon provedenog ispitivanja, primjeni neadekvatnog korelacijskog dodatka, te greški pri samoj izradi matematičkog modela. U proračunu je korišten korelacijski dodatak $C_A = 0$, dok podatak o korelacijskom dodatku ispitivanja [4] nije poznat. Najveća relativna greška pri izradi matematičkog modela može se dogoditi pri računanju regresijskih koeficijenata potrebnih za proračun. Pri aproksimaciji podataka korišten je polinom petog stupnja dok u radu [3] nije navedeno polinomom kojeg stupnja je proveden proračun regresijskih koeficijenata.

Metoda Radojčić [3] korištena za izračun ukupnog otpora glisirajućih formi nakon usporedbe s dostupnim podacima [4] pokazuje odstupanja ukupnog otpora unutar dozvoljenih granica za glisirajuće forme Serije 62. Pri upotrebi programskog alata koji je izrađen u svrhu proračuna ukupnog otpora i trima treba voditi računa o vrijednostima ili granicama ulaznih parametara. Ukoliko se radi o brodovima manjih masa Δ i uzdužnog položaja težišta mase LCG pomaknutog više prema krmi rezultati matematičkog modela pokazuju veće relativne greške nego kod brodova većih masa Δ i uzdužnog položaja težišta mase LCG pomaknutog više prema pramcu. Za pouzdanu prognozu ukupnog otpora i trima odabranog projekta potrebno je provesti modelska ispitivanja.

Literatura

- [1] FALTISEN, O.M.: "Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles", Cambridge University Press, 2005.
- [2] "Otpor i propulzija broda", interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [3] RADOJČIĆ, D.: "An Approximate Method for Calculation of Resistance and Trim of the Planing Hulls ", Ship Science Report No. 23, University of Southampton, December 1989.
- [4] CLEMENT, E.P., BLOUNT, D.L.: "Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms ", Society of Naval Architecture and Marine Engineers, Vol. 71, 1963.
- [5] MOLLAND, A.F., TURNOCK, S.R., HUDSON, D.A.: "Ship Resistance and Propulsion, Practical Estimation of Ship Propulsive Power", Cambridge University Press, 2011.