



MODELIRANJE BRODSKE RAVNOTEŽE I NJIHANJA NASTALOG UTJECAJEM MORSKIH VALOVA

Doc. dr. sc. Tatjana Stanivuk, prof., email: tstanivu@pfst.hr

Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu

Ajka Relja, mag. math., email: ajka.relja@gmail.com

Sveučilište u Splitu

Stipe Galić, mag. ing. naut., email: sgalic@pfst.hr

Ivan Šalov, student, email: salov99@gmail.com

Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu

Sažetak: Tijekom brodske plovidbe vremenski uvjeti uzrokuju raznolika njihanja broda, pokušavajući tako poremetiti njegovo stanje ravnoteže. Karakteristike ravnoteže broda utječu na njegovo konačno njihanje te određuju kako će se on ponašati u slučaju naglih promjena momenata prouzrokovanih iznenadnim promjenama intenziteta vjetrova, mora ali i opterećenja broda ukrcanim teretom ili prodorom vode. Važnost reduciranja njihanja broda i minimalizacije opterećenja prilikom vremenskih nepogoda posebno dolazi do izražaja prilikom projektiranja brzih kontejnerskih brodova i tankera velikih dimenzija, gdje se tijekom zadnjih par desetljeća postiže značajan napredak. Takva svojstva broda važno je procijeniti već u ranoj fazi izrade projekta brodske konstrukcije iz razloga što predstavljaju bitne proračune kojima bi bilo moguće eliminirati ili smanjiti njihanje broda koje utječe na putnike, teret i konstrukcijske elemente broda. Stoga je za ukupno razumijevanje ravnoteže broda nužno poznavanje kako fizikalne pojave dinamike njihanja broda tako i same prirode morskih valova koji je uzrokuju, pa se takvi odnosi, u ovom radu, opisuju upotrebom matematičkih modela.

Ključne riječi: njihanje broda, ravnoteža broda, modeliranje.

MODELLING OF THE SHIP STABILITY AND SWINGING CAUSED BY THE SEA WAVES

Abstract: Weather conditions during the ship's voyage can cause various motions that try to disrupt its state of balance and stability. The characteristics of the ship have an important effect on its final swinging that determines how it comports in case of the sudden change in torque caused by shifting of the wind, sea, payload or the water intrusion. Over the past few decades the importance of reducing the boat swinging and minimalizing the loading during bad weather has become evident in the design of fast container ships and tankers of large dimensions. Such ship properties are important to assess at an early stage of the structure design because essential calculations could possibly eliminate or reduce boat swinging that ultimately affects passengers, cargo and construction elements of the ship itself. Therefore, knowledge about physical phenomena of dynamical boat swinging and the very nature of the sea wave's creation is necessary for the ultimate understanding of the ship balance. In this paper such relations are described with use of mathematical models.

Keywords: boat swinging, balance of the ship, modelling.

1. Uvod

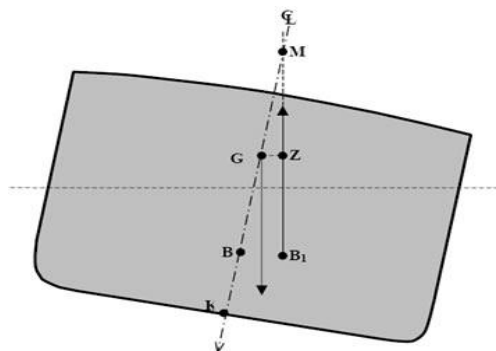
Matematika kao znanost i pomorstvo kao djelatnost prate se kroz povijest, a razvoj matematike bitno je utjecao na razvoj pomorstva. Već sama gradnja broda u osnovi ne bi bila moguća bez različitih matematičkih proračuna. Znanje matematike ima svoju primjenu i prilikom računanja kursa i pozicije u plovidbi te u proračunima vezanim za ekonomičnost prijevoza tereta i stabilnost broda.

Specifičnost pomorske plovidbe u odnosu na druge grane transporta je što veliki utjecaj na brod imaju čak dva medija: more i zrak. Takva čvrsta veza najčešće je obilježena dinamikom plovidbe u raznim vremenskim uvjetima, gdje vjetar, valovi i nemirno more uzrokuju gibanja broda odnosno njihanja. Gibanja mora (valovi, struje) i zraka (vjetar) uglavnom nastoje brod pomaknuti iz stanja ravnoteže, pa brod mora imati sposobnost stabilnosti kako bi se odupro takvim negativnim utjecajima. Stabilnost broda ovisi o formi trupa i razmještanju težine. Formu trupa projektira brodogradilište, dok je za razmještanje težina odgovoran zapovjednik broda.

Dinamičko njihanje problematično je zbog teškepredvidivosti, a djeluje na način da potiče potencijalnu kinetičku energiju i mase dobivaju određenu inerciju. Kako bi brod uopće bio u stanju sigurnog njihanja, dinamički utjecaj vanjskih sila zahtjeva dobru početnu stabilnost. Čvrstoća brodske konstrukcije u ovom radu se neće razmatrati već će se brod promatrati kroz prosječnu brodsku konstrukciju u ovisnosti o vrsti broda. Krajnji cilj ovog rada je objasniti dinamičku ravnotežu njihanja matematičkim formulama, pa se u tu svrhu navode jednadžbe njihanja koje uravnotežuju vanjske sile i momente koji djeluju na brod s unutrašnjim silama i momentima uslijed inercije²¹³.

2. Stabilnost broda

Slika 1. Točke stabilnosti broda (Izvor: Šalov 2016.)



Stabilnost broda može se definirat kao sila koja se odupire vanjskim silama da brod dovede u početno stanje. Kada se brod nalazi u uspravnom položaju, sile uzgona ravnomjerno djeluju na uronjeni dio broda pa se težište istisnine nalazi u uzdužnici ili simetrali broda. Ako se brod iz bilo kojeg razloga nagne, na strani nagiba poveća se volumen uronjenog dijela broda, dok se na suprotnoj strani nagiba taj volumen smanjuje. Tada se težište istisnine iz simetrale pomiče u novo težište istisnine uronjenog

dijela broda²¹⁴.

Položaj početnog metacentra M određen je njegovom udaljenosti od kobilice. Ovaj podatak vezan je za brodsku formu (gaz ili deplasman) pa je njegov položaj određen već u brodogradilištu a na brodu se očitava iz dijagramnog lista ili tablica u koje se ulazi sa srednjim gazom. Kada se uslijed djelovanja vanjskih sila brod nagne za određeni kut, njegov podvodni volumen mijenja oblik pa se točka B pomiče u točku B1. Sila uzgona sada djeluje iz točke B1 okomito na vodenu liniju. Presjek smjera sile uzgona i simetrale broda naziva se prividni metacentar (M)²¹⁵ (Slika 1.).

3. Oblici njihanja

²¹³Šalov, I., (2016), *Jednadžbe dinamičke ravnoteže njihanja broda*, Završni rad, Split.

²¹⁴Stanivuk, T.; Šarac, M.; Laušić, M., (2016), Rješavanje problema ukrcanja teških tereta na brod pomoću matematičkog izračuna, *Suvremeni promet: časopis za pitanja teorije i prakse prometa*, 36, 1-2, 38-42.

²¹⁵Uršić, J., (1964), *Stabilitet broda*, I. i II. dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.



Oscilacijsko gibanje broda odnosno njihanje $\eta_j(t)$ opisano je zakonom koji se iskazuje u kompleksnom obliku:

$$\eta_j(t) = \operatorname{Re}\{\delta_j e^{-i\omega_e t}\} = \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j), j = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

gdje su:

- δ_j kompleksne amplitude njihanja,
- $e^{-i\omega_e t}$ vremenska harmonijska funkcija,
- ω_e kružna frekvencija harmonijskog njihanja jednaka susretnoj kružnoj frekvenciji, progresivnog harmonijskog vala,
- η_{aj} i ε_j su realna vrijednost amplitude njihanja i fazni pomak u odnosu na nailazeći val.

Rezultirajuća oscilacijska gibanja broda ili njihanja sastoje se od triju translacijskih gibanja u smjeru osi x , y i z te triju rotacijskih gibanja oko osi x , y i z . Svaki oblik gibanja j ($j = 1, \dots, 6$) u odnosu na val pomaknut je za različiti fazni kut ε_j . Fazni pomak odnosi se na valnu elevaciju $\zeta = \zeta_a \cos(\omega_e t)$ u ishodištu translirajućeg koordinatnog sustava $O(x, y, z)$.

Translacijska gibanja:

- zalijetanje (u smjeru osi x)

$$\eta_1 = \eta_{a1} \cos(\omega_e t + \varepsilon_1) \quad (2)$$

- zanošenje (u smjeru osi y)

$$\eta_2 = \eta_{a2} \cos(\omega_e t + \varepsilon_2) \quad (3)$$

- poniranje (u smjeru osi z)

$$\eta_3 = \eta_{a3} \cos(\omega_e t + \varepsilon_3) \quad (4)$$

Rotacijska gibanja:

- valjanje (oko osi x)

$$\eta_4 = \eta_{a4} \cos(\omega_e t + \varepsilon_4) \quad (5)$$

- posrtanje (oko osi y)

$$\eta_5 = \eta_{a5} \cos(\omega_e t + \varepsilon_5) \quad (6)$$

- zaošijanje (oko osi z)

$$\eta_6 = \eta_{a6} \cos(\omega_e t + \varepsilon_6) \quad (7)$$

Polazeći od položaja broda u stanju mirovanja, pozitivan pomak

- η_1 odgovara pomaku u smjeru napredovanja,
- η_2 odgovara bočnom pomaku ulijevo,
- η_3 odgovara izronu.

Rotacijski pomaci slijede pravilo desne ruke, odnosno pozitivan pomak

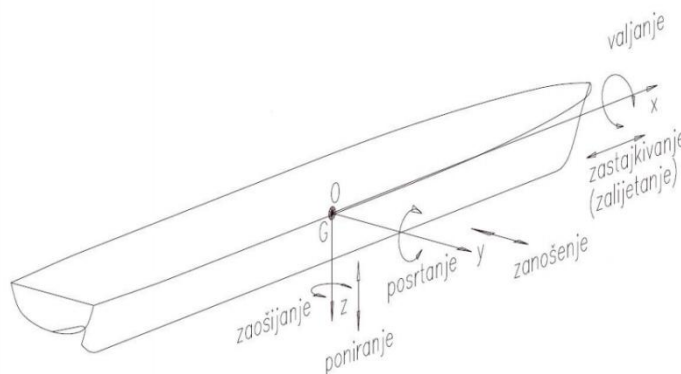
- η_4 odgovara uranjanju desnog boka broda,
- η_5 odgovara uranjanju pramca,
- η_6 odgovara zakretanju pramca ulijevo.

Samo poniranje, ljuljanje i posrtanje, čista su oscilatorna gibanja kod kojih djeluje povratna sila ili moment nastojeći povratiti brod u ravnotežni položaj. U slučaju zalijetanja, zanošenja i zaošijanja brod se nužno ne vraća u izvorni ravnotežni položaj²¹⁶.

²¹⁶Martić, I., (2014), *Procjena pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda*, Diplomski rad, Zagreb.



Slika 2. Šest stupnjeva slobode gibanja broda



Izvor: Šalov (2016.)

Trodimenzijska metoda rubnih elemenata temelji se na principu Greenova integralnog teorema kako bi predviđela hidrodinamičke koeficijente, sile i gibanja broda na valovima za svih 6 stupnjeva slobode gibanja. Također, koristi se za predviđanje poniranja, posrtanja i ljuljanja broda pri konstantnim brzinama napredovanja proizvodnih smjerova nailaska broda na valove. Posebna pažnja stavlja se na predviđanje ljuljanja uzimajući u obzir važnost prigušenja u jednadžbi gibanja²¹⁷.

Prema Greenovu teoremu moguće je transformirati trodimenzionalnu linearnu homogenu diferencijalnu jednadžbu u dvodimenzionalnu integralnu jednadžbu. Na taj način trodimenzionalna Laplaceova (potencijalna) jednadžba transformira se u površinsku integralnu jednadžbu. Površina tijela podijeljena je na n dovoljno malenih panela, pa se može pretpostaviti kako su izvori (ponori) snaga potencijalnog strujanja uzrokovana izvorom konstantni po cijeloj površini pojedinog elementa. Prednost ove metode je u redukciji problema na dvodimenzionalni površinski problem. Panel metoda tehnika je koja se koristi najčešće za analizu linearnog odziva stabilnog stanja velikih volumenskih struktura na valovitom moru²¹⁸.

4. Simetrija brodskog njihanja

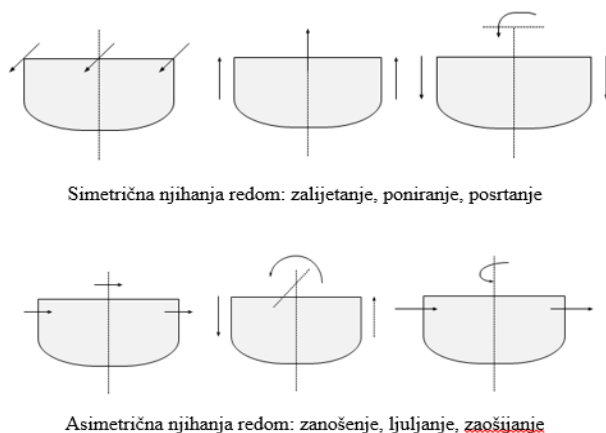
S obzirom na brodsku konstrukciju, koja uglavnom ima uzdužnu ravninu simetrije, njihanja se dijele na simetrična i asimetrična.

Za simetrična njihanja vrijedi kako je vektor brzine gibanja proizvoljne točke s jednog boka broda, u odnosu na vertikalno uzdužnu ravninu simetrije, zrcalno simetričan vektoru gibanja zrcalno simetrične točke s drugog boka broda.

²¹⁷ Stanivuk, T.; Zore, I., (2014), Eulerova i Bernoullijeva jednadžba u linearnoj teoriji valova, Zbornik radova - V. međunarodno savjetovanje "Savremeni trendovi u saobraćaju, logistici i ekologiji održivog razvoja", Travnik.

²¹⁸ Tomašević, S., (2003), Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija, Magistarski rad, Zagreb.

Slika 3. Podjela simetričnih i asimetričnih brodskih njihanja



Simetričnim njihanjima smatra se zalijetanje, poniranje i posrtanje, dok se u asimetrična njihanja ubraja zanošenje, ljuljanje, i zaošijanje.

U linearnoj teoriji njihanja broda ne postoji sprega između simetričnih i asimetričnih njihanja. Primjerice, vertikalna sila koja djeluje u težištu broda može uzrokovati zalijetanje, poniranje i posrtanje, ali neće imati za posljedicu zanošenje, ljuljanje i zaošijanje²¹⁹.

Izvor: Šalov (2016.)

5. Modeliranje dinamičke ravnoteže

Jednadžbe njihanja broda u šest stupnjeva slobode proizlaze iz drugog Newtonovog zakona po kojem je sila koja djeluje na tijelo jednaka umnošku mase i ubrzanja. Za korektno matematičko zapisivanje nužan je zapis u inercijskom koordinatnom sustavu koji se giba srednjom brzinom. Budući da se sile i momenti koji djeluju na tijelo definiraju u koordinatnom sustavu vezanom za brod koji oscilira zajedno s njim, jednadžbe gibanja se zapisuju Eulerovim jednadžbama gibanja krutog tijela. Linearizacijom istih dobiva se opći oblik jednadžbi njihanja broda²²⁰:

$$\sum_{k=1}^6 m_{jk} \ddot{\eta}_k(t) = F_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

gdje su:

- m_{jk} komponente poopcene matrice masa (koja uključuje mase i momente tromosti),
- $\ddot{\eta}_k$ ubrzanja gibanja u k -tom stupnju slobode,
- F_j ukupne sile i momenti koji djeluju na tijelo u smjeru j .

U slučaju simetričnosti broda s obzirom na središnju vertikalnu ravninu dobiva se šest jednadžbi dinamičke ravnoteže:

- Zalijetanje (engl. Surge)

$$m(\ddot{\eta}_1 + \bar{z}_c \ddot{\eta}_5) = F_{\eta 1}, \quad (9)$$

- Zanošenje (engl. Sway)

$$m(\ddot{\eta}_2 - \bar{z}_c \ddot{\eta}_4 + \bar{x}_c \ddot{\eta}_6) = F_{\eta 2}, \quad (10)$$

- Poniranje (engl. Heave)

$$m(\ddot{\eta}_3 + \bar{x}_c \ddot{\eta}_5) = F_{\eta 3}, \quad (11)$$

- Ljuljanje (engl. Roll)

²¹⁹ Čorić, V.; Prpić-Oršić, J., (2006), *Pomorstvenost plovnih objekata*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.

²²⁰ Journée, J.M.J.; Pinkster J., (2002), *Introduction in ship hydromechanics*, Delft University of Technology, Delft.



$$I_{44}\ddot{\eta}_4 - I_{46}\ddot{\eta}_6 - m\bar{z}_c\ddot{\eta}_2 = F_{\eta 4}, \quad (12)$$

- Posrtanje (engl. *Pitch*)

$$I_{55}\ddot{\eta}_5 + m\bar{z}_c\ddot{\eta}_1 - m\bar{z}_c\ddot{\eta}_3 = F_{\eta 5}, \quad (13)$$

- Zaošijanje (engl. *Jaw*)

$$I_{66}\ddot{\eta}_6 - I_{64}\ddot{\eta}_4 + m\bar{x}_c\ddot{\eta}_2 = F_{\eta 6}. \quad (14)$$

gdje je:

- m ukupna masa broda,
- I_{jj} , I_{jk} , momenti tromosti,
- $\bar{x}_c$ i $\bar{z}_c$ koordinate težišta broda u koordinatnom sustavu vezanom za brod.

Gornje jednadžbe vrijede i u inercijskom koordinatnom sustavu jer su linearizacijom nestale razlike između koordinatnih sustava²²¹.

Momenti koji djeluju na tijelo tijekom rotacije jednaki su umnošku momenata tromosti i kutnog ubrzanja. Tijelo koje se njiše na valu u svakom trenutku je u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke, promjenjive hidrostatičke sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama te momentima mase tijela. Primjerice, tijekom poniranja i posrtanja $F_{\eta 3}$ i $F_{\eta 5}$ su vektori ukupne sile, odnosno momenata koji djeluju na tijelo kao funkcija vremena. U linearnoj teoriji te sile se mogu prikazati kao suma uzbudnih sila koje uzrokuju oscilacijsko gibanje ($F_3(t)$ i $F_5(t)$) i hidrodinamičkih sila ($F_{H3}(t)$ i $F_{H5}(t)$), što je prikazano jednadžbama:

$$F_3(t) + F_{H3}(t) = F_{\eta 3}(t), \quad (15)$$

$$F_5(t) + F_{H5}(t) = F_{\eta 5}(t), \quad (16)$$

gdje se uzbudne sile mogu izraziti kao:

$$F_3 \cos(\omega_e t + \varepsilon_{w3}) = F_3(t), \quad (17)$$

$$F_5 \cos(\omega_e t + \varepsilon_{w5}) = F_5(t). \quad (18)$$

F_3 i F_5 amplitude su uzbudne sile poniranja i uzbudnog momenta posrtanja, dok su ε_{w3} i ε_{w5} fazni pomaci uzbuđe s obzirom na val. Uzbudne sile dobiju se rješavanjem problema djelovanja valova na nepomično tijelo²²².

Hidromehanička sila sastoji se od hidrostatičke i hidromehaničke sile:

$$F_{H3}(t) = A_{33}\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5, \quad (19)$$

$$F_{H5}(t) = A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + A_{55}\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5, \quad (20)$$

gdje su:

- A_{jk} i B_{jk} koeficijenti dodatne mase i prigušenja ovisni o susretnoj frekvenciji,
- C_{jk} je koeficijent povratne sile, neovisan o frekvenciji.

Hidromehaničke sile dobiju se rješavanjem problema njihanja tijela na mirnoj slobodnoj površini. Koristeći matricnu notaciju, inercijske sile i momenti oko koordinatnih osi mogu se izraziti kao:

²²¹Martić, I., (2014), *Procjena pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda*, Diplomski rad, Zagreb.

²²²Stanivuk, T.; Zore, I.; Lukša, F., (2014), Calculation of the hydrodynamic loading on a vertically submerged cylinder by means of the Morison equation, *Book of Proceedings - 6th International Maritime Science Conference*, Split.



$$\{F_l\} = [M_{jk}]\{\ddot{\eta}_j\} = \text{Re}\{-\omega^2[M_{jk}]\{\delta_j\}e^{-i\omega t}\}, \quad (21)$$

gdje je

- $[M_{jk}]$ matrica mase tijela i momenata tromosti tijela oko koordinatnih osi.

$$[M_{jk}] = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & M_{z_g} & 0 \\ 0 & M & 0 & -M_{z_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_{z_g} & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ M_{z_g} & 0 & 0 & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{46} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Simbol M predstavlja masu tijela, I_{jj} su momenti tromosti mase oko j -tih osi, a I_{jk} centrifugalni momenti mase u odnosu na koordinatni sustav broda. Uz pretpostavku uzdužne simetrije, jedini centrifugalni moment mase koji se javlja u matrici je I_{46} .

$$I_{44} = \int_L (y_b^2 + z_b^2) dm \quad (23)$$

$$I_{55} = \int_L (x_b^2 + z_b^2) dm \quad (24)$$

$$I_{66} = \int_L (x_b^2 + y_b^2) dm \quad (25)$$

$$I_{46} = \int_L x_b z_b dm \quad (26)$$

Ako brod ima simetriju u odnosu na os y_b , za spregu ljuljanja i zaošijanja on je jednak nuli dok je u suprotnom mala veličina.

Masa teretnih brodova kada ne prevoze teret koncentrirana je na krajevima broda (strojarnica na krmi i balastna voda na pramcu), dok je u slučaju potpuno opterećenog broda onak koncentrirana u blizini sredine broda. Stoga je kod potpuno opterećenog broda uobičajeno da momenti tromosti I_{55} i I_{66} budu manji. Momenti tromosti mase često se izražavaju pomoću radijusa tromosti i mase tijela kao:

$$I_{44} = k_{44}^2 M \quad (27)$$

$$I_{55} = k_{55}^2 M \quad (28)$$

$$I_{66} = k_{66}^2 M \quad (29)$$

Ako raspored masa nije poznat, radijusi tromosti aproksimiraju se kao:

$$k_{44} \approx 0,3 B \text{ do } 0,4 B, \quad (30)$$

$$k_{55} \approx 0,22 L \text{ do } 0,28 L, \quad (31)$$

$$k_{66} \approx 0,22 L \text{ do } 0,28 L. \quad (32)$$

Gdje su:

- L duljina broda,
- B širina broda.



Ostali elementi van dijagonalne matrice jednaki su nuli ako se ishodište koordinatnog sustava poklapa s težištem tijela. Međutim, najčešće je najpogodnije postaviti ishodište na vodnoj liniji, a u tom slučaju vertikalna udaljenost težišta z_G od ishodišta koordinatnog sustava $O(x, y, z)$ nije jednaka nuli. Dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidromehaničkih i uzbudnih sila:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} = \text{Re}\{\zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}\}, \quad (33)$$

odnosno uz pretpostavku harmonijskog gibanja, sljedećim sustavom algebarskih jednadžbi:

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{i\omega t} = \zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}, \quad (34)$$

Kako gornja jednakost mora biti zadovoljena u svakom trenutku, uvjet dinamičke ravnoteže svodi se na sljedeći sustav kompleksnih algebarskih jednadžbi s nepoznicama δ_j , $j = 1, \dots, 6$ ²²³.

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\} = \zeta_a\{F_j\}, \quad (35)$$

gdje je:

- $[M_{jk}]$ - matrica mase tijela,
- $[A_{jk}]$ - matrica pridruženih masa,
- $[B_{jk}]$ - matrica hidrodinamičkog prigušenja i
- $[C_{jk}]$ - matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila.

6. Zaključak

Tijekom brodske plovidbe vremenski uvjeti uzrokuju raznolika njihanja broda, pokušavajući tako poremetiti njegovo stanje ravnoteže. Karakteristike ravnoteže broda utječu na njegovo konačno njihanje te određuju kako će se on ponašati u slučaju naglih promjena momenata prouzrokovanih iznenadnim promjenama intenziteta vjetrova, mora ali i opterećenja broda ukrcanim teretom ili prodorom vode.

Takva svojstva broda važno je procijeniti već u ranoj fazi izrade projekta brodske konstrukcije iz razloga što predstavljaju bitne proračune kojima bi bilo moguće eliminirati ili smanjiti njihanje broda koje utječe na putnike, teret i konstrukcijske elemente broda. Osim što brodska stabilnost ovisi o dizajnu broda, ovisi i o načinu ukrcanja tereta kojeg obavlja posada broda.

Metacentarska visina određuje silu koja će se odupirati valovima, i takva sila ne smije biti manja od propisane. Međutim, visina ne smije biti ni prevelika zbog mogućnosti velike inercije te otežanih uvjeta života na brodu uslijed brzih perioda valjanja. Na temelju perioda valjanja zapovjednik ili časnik palube može odrediti promjenu elemenata stabilnosti broda tijekom plovidbe. Stoga je za ukupno razumijevanje ravnoteže broda nužno poznavanje kako fizikalne pojave dinamike njihanja broda tako i same prirode morskih valova koji je uzrokuju.

LITERATURA

[1] Čorić, V.; Prpić-Oršić, J., (2006), *Pomorstvenost plovni objekata*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.

²²³Čorić, V.; Prpić-Oršić, J., (2006), *Pomorstvenost plovni objekata*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.



- [2] Journée, J.M.J.; Pinkster J., (2002), *Introduction in ship hydromechanics*, Delft University of Technology, Delft.
- [3] Martić, I., (2014), *Procjena pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda*, Diplomski rad, Zagreb.
- [4] Stanivuk, T.; Šarac, M.; Laušić, M., (2016), Rješavanje problema ukrcaja teških tereta na brod pomoću matematičkog izračuna, *Suvremeni promet: časopis za pitanja teorije i prakse prometa*, 36, 1-2, 38-42.
- [5] Stanivuk, T.; Zore, I., (2014), Eulerova i Bernoullijeva jednačba u linearnoj teoriji valova, *Zbornik radova - V. međunarodno savjetovanje "Savremeni trendovi u saobraćaju, logistici i ekologiji održivog razvoja"*, Travnik.
- [6] Stanivuk, T.; Zore, I.; Lukša, F., (2014), Calculation of the hydrodynamic loading on a vertically submerged cylinder by means of the Morison equation, *Book of Proceedings - 6th International Maritime Science Conference*, Split.
- [7] Šalov, I., (2016), *Jednačbe dinamičke ravnoteže njihanja broda*, Završni rad, Split.
- [8] Tomašević, S., (2003), *Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija*, Magistarski rad, Zagreb.
- [9] Uršić, J., (1964), *Stabilitet broda*, I. i II. dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.