

# Proračun odziva broda na valovitom moru

---

Tanocki, Ela

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:935343>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ela Tanocki**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Ela Tanocki

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Ivanu Čatipoviću, dipl.ing. te Ivani Martić, mag.ing. na strpljenju, pomoći te prenesenom znanju prilikom izrade ovog rada.

Ela Tanocki



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ela Tanocki** Mat. br.: 0035186671

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRORAČUN ODZIVA BRODA NA VALOVITOM MORU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **RESPONSE CALCULATION OF A SHIP ON SEA WAVES**

Opis zadatka:

Za zadani brod potrebno je provesti proračun odziva broda na valovitom moru. U obzir uzeti svih šest stupnjeva slobode gibanja broda. Proračun se treba temeljiti na potencijalnom strujanju uz primjenu trodimenzionalne metode rubnih elemenata (eng. boundary element method).

Proračun provesti za zadane:

- brzine napredovanja broda,
- smjerove nailaska valova,
- stanja valovitog mora.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Proračunati prijenosne funkcije odziva broda.
2. Proračunati spektre odziva broda te značajne vrijednosti odziva.
3. Napraviti sistematičan prikaz dobivenih rezultata.

Napomena: U radu koristiti programski paket HydroSTAR (Bureau Veritas).


Zadatak zadan:  
25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ivan Čatipović

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 25. veljače 2016  
**2. rok (izvanredni):** 20. lipnja 2016.  
**3. rok:** 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 29.2., 02. i 03.03. 2016.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2016.  
**3. rok:** 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. POMORSTVENOST BRODA.....	2
2.1. Morski valovi .....	2
2.1.1. Harmonijski valovi.....	2
2.1.2. Difrakcijski i radijacijski valovi.....	4
2.2. Frekvencija i susretni kut valova.....	7
2.3. Njihanje broda na harmonijskim valovima.....	8
2.3.1. Translacijska gibanja.....	8
2.3.2. Rotacijska gibanja.....	8
2.3.3. Koordinatni sustavi.....	10
2.4. Dinamička ravnoteža njihanja.....	11
2.5. Linearna teorija valova.....	12
2.6. Potencijalna teorija.....	14
2.7. Trodimenzionalna metoda rubnih elemenata.....	16
2.8. Odziv broda na morskim valovima.....	17
2.8.1. Prijenosna funkcija.....	18
2.8.2. Tabainov spektar valova.....	18
3. PRORAČUN ODZIVA ZADANE FORME BRODA ZA SVIH 6 STUPNJEVA SLOBODE GIBANJA .....	20
3.1. Princip rada programskog paketa HydroSTAR .....	20
3.2. Priprema podataka za HydroSTAR.....	20
3.3. Tabainov spektar valova za značajne valne visine.....	23
3.4. Prikaz dobivenih rezultata za odziv broda na valovima.....	25
3.4.1. Prikaz dobivenih rezultata za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	25
3.4.2. Prikaz dobivenih rezultata za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	31
3.5. Značajne vrijednosti odziva.....	34
4. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOG A.....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Pravilni val, fotografski prikaz.....	3
Slika 2.	Pravilni val, vremenski zapis.....	3
Slika 3.	Kursni ili susretni kut .....	7
Slika 4.	Prikaz translacijskih i rotacijskih pomaka broda.....	9
Slika 5.	Ulazni podaci broda.....	21
Slika 6.	Mreža panela do vodne linije u programu HydroSTAR.....	22
Slika 7.	Spektri valova za zadane značajne valne visine.....	24
Slika 8.	Spektar odziva za zalijetanje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	25
Slika 9.	Spektar odziva za zanošenje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	26
Slika 10.	Spektar odziva za poniranje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	27
Slika 11.	Spektar odziva za ljuljanje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	28
Slika 12.	Spektar odziva za posrtanje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	29
Slika 13.	Spektar odziva za zaošijanje, $H_{1/3} = 7.20\text{m}$ .....	30
Slika 14.	Spektar odziva za zalijetanje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	31
Slika 15.	Spektar odziva za zanošenje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	31
Slika 16.	Spektar odziva za poniranje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	32
Slika 17.	Spektar odziva za ljuljanje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	32
Slika 18.	Spektar odziva za posrtanje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	33
Slika 19.	Spektar odziva za zaošijanje, $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ .....	33
Slika 20.	Prijenosna funkcija odziva za poniranje .....	37
Slika 21.	Prijenosna funkcija odziva za posrtanje.....	37
Slika 22.	Prijenosna funkcija odziva za ljuljanje.....	38
Slika 23.	Prijenosna funkcija odziva za zalijetanje.....	38
Slika 24.	Prijenosna funkcija odziva za zanošenje.....	39
Slika 25.	Prijenosna funkcija odziva za zaošijanje.....	39

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Značajne vrijednosti odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 7.20m$ .....	34
Tablica 2.	Značajne vrijednosti odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 8.57m$ .....	34



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$M$	kg	masa broda
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća morske vode
$p$	Pa	tlak
$g$	m/s <sup>2</sup>	ubrzanje zemljine sile teže
$A_{jk}$		dodatna masa u smjeru $j$ uslijed njihanja u smjeru $k$
$B_{jk}$		koeficijent prigušenja u smjeru $j$ uslijed njihanja u smjeru $k$
$C_{jk}$		hidrostatički povratni koeficijent u smjeru $j$ uslijed njihanja u smjeru $k$
$H_{1/3}$	m	značajna valna visina
$x, y, z,$		translacijski koordinatni sustav
$x_0, y_0, z_0$		nepomični koordinatni sustav
$x_b, y_b, z_b$		koordinatni sustav broda
$H_{Ra}$		prijenosna funkcija
$R_a$		amplituda odziva
$T_z$	s	nulti period vala
$T_m$	s	modalni period vala
$U$	m/s	brzina broda
$L$	m	duljina broda
$\omega$	rad/s	frekvencija vala
$\omega_e$	rad/s	susretna frekvencija

$\Phi$	$m^2/s$	potencijal brzine strujanja
$\Phi_0$	$m^2/s$	potencijal nailaznog vala
$\Phi_7$	$m^2/s$	difrakcijski potencijal
$\zeta$	m	elevacija vala
$\zeta_a$	m	amplituda vala
$\lambda$	m	valna duljina
$RAO$		operator amplitude odziva
$S_\zeta$	$m^2/s$	spektar valova
$S_R$		spektar odziva
<b>i, j, k</b>		jedinični vektori u smjeru osi $x, y$ i $z$ redosljedno
$m_n$	$m^2$	n-ti moment spektra
$t$	s	vrijeme
$u, v_x$	m/s	komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi $x$
$w, v_z$	m/s	komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi $z$
$a_{ij}$	kg/m	dvodimenzijaska dodatna masa u smjeru $i$ , uslijed njihanja u smjeru $j$
$b_{ij}$	kg/ms	dvodimenzijaski koeficijent prigušenja u smjeru $i$ , uslijed njihanja u smjeru $j$
$\eta_{ai}$	m	amplituda $i$ -tog oblika njihanja ( $i=1,2,3$ )
$\eta_{ai}$	rad	amplituda $i$ -tog oblika njihanja ( $i=4,5,6$ )

## **SAŽETAK**

Cilj ovog završnog zadatka bio je izvršiti proračun odziva broda na valovitom moru za zadane kutove nailaska vala na brod te proračunati prijenosne funkcije odziva broda, proračunati spektre odziva broda te značajne vrijednosti odziva. U obzir je uzeto svih šest stupnjeva slobode gibanja broda.

Proračun se temelji na potencijalnom strujanju uz primjenu trodimenzionalne metode rubnih elemenata koja diskretizira trodimenzionalni model broda na veliki broj konačnih elemenata. U radu je korišten programski paket HydroSTAR (Bureau Veritas).

## **SUMMARY**

The aim of this final assignment was to accomplish an analysis of ships responsiveness to billowy sea with the default angles of approaching wave, to analyse conveying functions of ships responsiveness and also to analyse the spectres of ships responsiveness and notable values of responsiveness. All six degrees of freedom were considered when dealing with ship motions.

The analysis is based on potential current with appliance of the three-dimensional method of boundary elements which discretises the three-dimensional ship model to a large amount of finite elements. The programme package used in this paper is HydroSTAR (Bureau Veritas).

## **1. UVOD**

U pomorstvenost broda ubrajamo sva stanja koja su rezultat plovidbe objekata na valovitom moru. Svaki objekt koji se nalazi na moru (bez obzira bio taj objekt fiksni ili plutajući) je izložen djelovanju valova koji uzrokuju značajne promijene u vidu pomaka i naprežanja. Da bi osigurali duži radni vijek plovnih ili fiksnih objekata potrebno je detaljno razmotriti utjecaje njihanja kojima su oni izloženi i to ne samo u fazi projektiranja, nego i pri raznim uvjetima eksploatacije.

Prilikom analize odziva broda na morskim valovima najprije moramo dobro poznavati dinamiku njihanja broda, a samim time i djelovanje valova na uzburkanom moru koje se smatra slučajnim procesom te se njegove značajke mogu odrediti spektralnom analizom.

Spektralna analiza daje nam rezultate pomoću kojih odabiremo pomorstveno zadovoljavajuću formu broda u ranijoj fazi projektiranja broda. Zahvaljujući rezultatima spektralne analize, konstruiranje zahtjevnijih brodova je znatno olakšano i poboljšano.

## 2. POMORSTVENOST BRODA

### 2.1. Morski valovi

Kako bi što bolje razumjeli pojavu ljuľanja broda na valovima potrebno je razumjeti nastanak i djelovanje valova. Na moru raspoznajemo slijedeće vrste valova:

- Razilazni valovi-nastaju prilikom plovidbe broda ili valovi potencijalnog prigušnja-nastali zbog njihanja plovnog objekta
- Vjetrom uzrokovani valovi
- Plimni valovi
- Valovni uzrokovani potresom ili pomicanjem zemljinih slojeva na površini
- Valovi koji nastaju na slobodnoj površini fluida uzrokovani gibanjem fluida u djelomično napunjenim tankovima

Od svih nabrojanih vrsta valova, najvažniji su vjetrovni valovi. Vjetrovni valovi su vrlo nepravilni te je nemoguće predvidjeti njihovo ponašanje u realnom vremenu, ali je moguće saznati njihova svojstva tj. njihovu visinu i periode. Pomoću metode superpozicije nepravilni valovi mogu se promatrati kao skup pravilnih valova koji pojedinačno djeluju na brod. Princip superpozicije omogućuje analiziranje kompleksnih valnih sustava preko svojstava jednostavnih harmonijskih valova.

#### 2.1.1 Harmonijski valovi

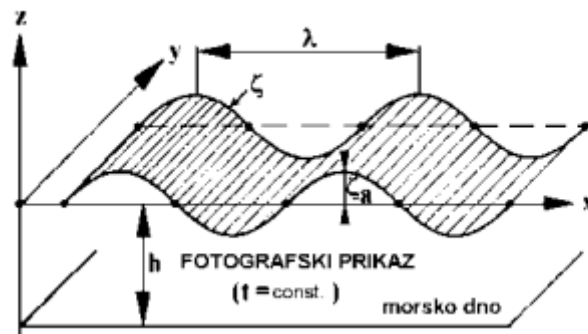
Harmonijski valovi predstavljaju periodično ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Karakteriziraju ih slijedeća svojstva:

- Središte koordinatnog sustava nalazi se na razini mirne vode i vertikalna os  $z$  je usmjerena prema gore
- Dubina vode  $h$  je udaljenost mjerena od razine morskog dna do razine mirne vode. Uvijek je pozitivna vrijednost pa je na morskome dnu  $z = -h$
- Valni brijeg je najviša točka vala
- Valni dol je najniža točka vala
- Valna amplituda  $\zeta_a$  je udaljenost od razine mirne vode do valnog brijega ili dola

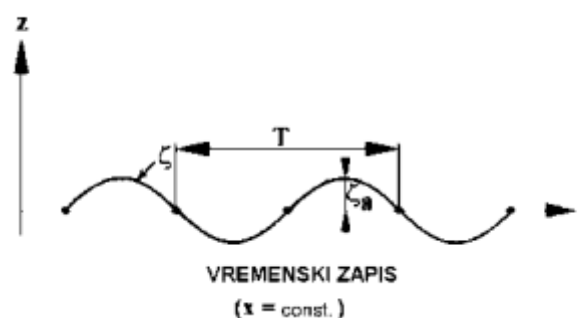
- Valna visina  $H$  je udaljenost između najviše i najniže točke vala odnosno između valnog brijega i valnog dola. Za sinusoidne valnove, valna visina je dvostruko veća od valne amplitude pa vrijedi

$$H = 2 \cdot \zeta_a \quad (2.1.)$$

- Valna duljina  $\lambda$  je horizontalna udaljenost između dvaju susjednih brijegova mjerena je usmjeru napredovanja vala
- Valni period  $T$  je vremenski interval između dvaju susjednih brijegova
- Strmost vala  $\frac{H}{\lambda}$  je omjer visine vala i njegove duljine.



Slika 1. Pravilni val, fotografski prikaz [2]



Slika 2. Pravilni val, vremenski zapis [2]

### 2.1.2. Difrakcijski i radijacijski valovi

Nailazni val u obliku harmonijskog progresivnog vala naišavši na tijelo koje je prethodno mirovalo ili bilo uronjeno predat će dio svoje energije tijelu, dok će dio energije nastaviti s valom napredovanje iza tijela. Tijelo koje je primilo energiju od vala počinje se oscilatorno gibati te će emitirati energiju koja se radialno širi u svim horizontalnim smjerovima te ukoliko tijelo nije kruto ta energija će prouzrokovati deformacije.

Val će doživjeti promijenu koja rezultira smanjenju njegove visine, dok su duljina, period i frekvencija vala nepromijenjeni. Takvu promijenu vala nazivamo difrakcija ili lom. Difrakcija ima važnu ulogu u određivanju njihanja broda na valovima.

Pod pretpostavkom da su elastične deformacije tijela zanemarive, razlika energija nailaznog vala i njegova oblika nakon sudara s tijelom, u ravnoteži je s ostalim komponentama nastalim gibanjem tijela [1], a to su:

- Energija inercijskih sila mase tijela
- Energija uslijed rada povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja
- Energija valova radijacije koji se šire od tijela

Sliku strujanja oko uronjenog dijela volumena tijela se može odrediti u dva koraka, ukoliko se tijelo njiše na valu. U prvom koraku se opisuje model strujanja oko nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala  $\zeta_0(x, y, z; t)$  i njegove difrakcije. Takvo strujanje možemo opisati dvijema funkcijama: funkcijom potencijala brzine strujanja nailazećeg vala  $\Phi_0$  i funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcije  $\Phi_7$

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (2.2.)$$

Strujanje u difrakcijskoj komponenti vala mora zadovoljiti uvijete da se nalazi u idealnoj tekućini, da se radi o potencijalnom strujanju, da su zadovoljeni kinematički i dinamički uvijeti na slobodnoj površini te nepromočivost dna, ali mora zadovoljiti i dodatne uvijete kao što su rubni uvijeti na oplakanoj površini tijela  $S$  te uvijet radijacije u beskonačnosti.



Uvjet nepromočivosti oplakane površine  $S$  može se izraziti preko normalne komponente rezultirajuće brzine strujanja u točki te površine  $v_n$

$$v_n = \mathbf{n} \text{ grad} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (2.3)$$

Potencijal difrakcijske komponente prikazan kao realni dio kompleksne funkcije:

$$\Phi_7 = \text{Re}[\zeta_a \Phi_7 e^{-i\omega t}] \quad (2.4)$$

U drugom koraku pručava se njihanje tijela u mirnoj tekućini, bez prisutnosti nailazećeg vala. Uvjet radijacije u beskonačnosti odnosi se na potencijal brzine difrakcijske komponente vala koji dovoljno daleko od tijela mora zadovoljiti uvjet radijacije.

U cijelom modelu koji opisuje njihanje tijela na valu posebnu ulogu ima energija radijacijskih valova koja se očituje kao:[1]

- Stišavanje (prigušivanje) njihanja tijela
- Prividno povećanje mase tijela prilikom njihanja

Valovi radijacije nastaju na mirnoj vodi kao posljedica prisilnog oscilacijskog gibanja tijela pomacima amplitude na slobodnoj površini tekućine. Strujanje oko uronjenog dijela volumena tijela opisano je funkcijama brzine strujanja  $\Phi_j$  u nastalim valovima radijacije  $\zeta_j (j = 1 \dots 6)$ . Brzina strujanja je proporcionalna amplitudama njihanja, pripadne funkcije potencijala mogu se prikazati koristeći kompleksnu notaciju:

$$\Phi_j = \text{Re}[\delta_j \Phi_j e^{-i\omega t}], \quad j = 1 \dots 6 \quad (2.5)$$

Gdje su:  $\delta_j$  - kompleksne amplitude njihanja

$\Phi_j$ - kompleksna prostorna funkcija potencijala brzine strujanja

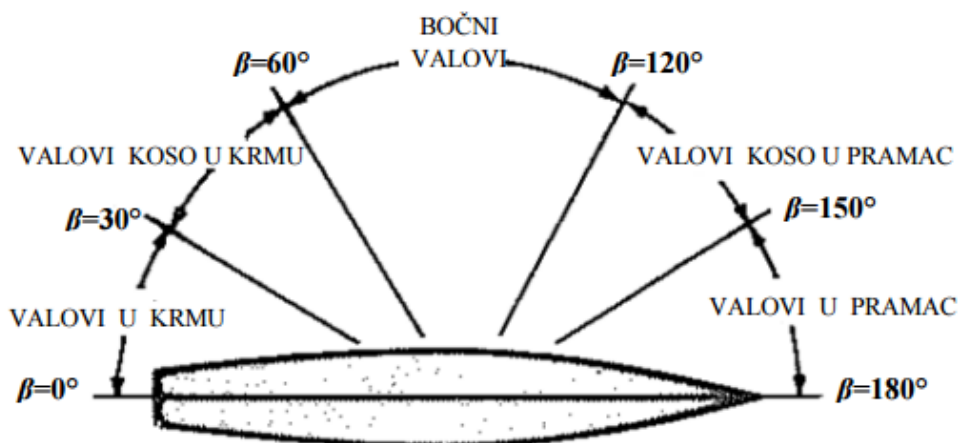
$\Phi_j$  je određena realnom (kosinusnom)  $\Phi_{Cj}$  i imaginarnom (sinusnom)  $\Phi_{Sj}$  komponentom

$$\Phi_j(x, y, z) = \Phi_{Cj}(x, y, z) + \Phi_{Sj}(x, y, z) \quad (2.6)$$

Valovi radijacije moraju zadovoljiti uvijete radijacije u velikoj udaljenosti od tijela, a uslijed nepromočivosti oplakane površine  $S$  uronjena dijela potrebno je uvesti dodatni rubni uvjet za brzinu strujanja u valu radijacije. Ne postoji strujanje kroz oplakanu površinu pa normalna komponenta brzine čestice tekućine mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke  $P(x_p, y_p, z_p)$  oplakane površine  $S$ .

## 2.2. Frekvencija i susretni kut valova

Frekvencija tijela koje se njiše i koja napreduje na valovima nije jednaka frekvenciji valova. Frekvencija tijela ovisi o brzini broda i kutu pod kojim brod nailazi na valove, a ne samo o frekvenciji valova. Ako brod plovi u smjeru napredovanja valova period susretanja ili susretni period  $T_e$  bit će veći od perioda valova, a frekvencija susretanja ili susretna frekvencija bit će manja od frekvencije valova. Ukoliko valovi dolaze s boka neće biti razlike između valne i susretne frekvencije. Susretni ili kursni kut  $\beta$  je kut pod kojim valovi nadolaze na brod, a definira se kao kut koji zatvaraju vektor brzine broda i vektor brzine vala.



Slika 3. Kursni ili susretni kut[1]

### 2.3. Njihanje broda na harmonijskim valovima

Prilikom razmatranja njihanja broda na valovima pretpostavlja da je brod kruto tijelo te se smatra se da pomaci koji nastaju pri savijanju i uvijanju broda nemaju utjecaja na njegova njihanja. Djelovanjem različitih vanjskih sila i momenata nastaju njihanja fluida te dinamika krutog tijela. Postoji šest stupnjeva slobode gibanja broda prilikom njegovog njihanja.

Tih šest stupnjeva slobode gibanja možemo podijeliti u dvije grupe:

#### 2.3.1. Translacijska gibanja

Položaj težišta mase broda  $G$  u odnosu na položaj točke  $O$  koja se kreće konstantnom brzinom  $U$  može se odrediti poznavajući slijedeće translacijske pomake: [2]

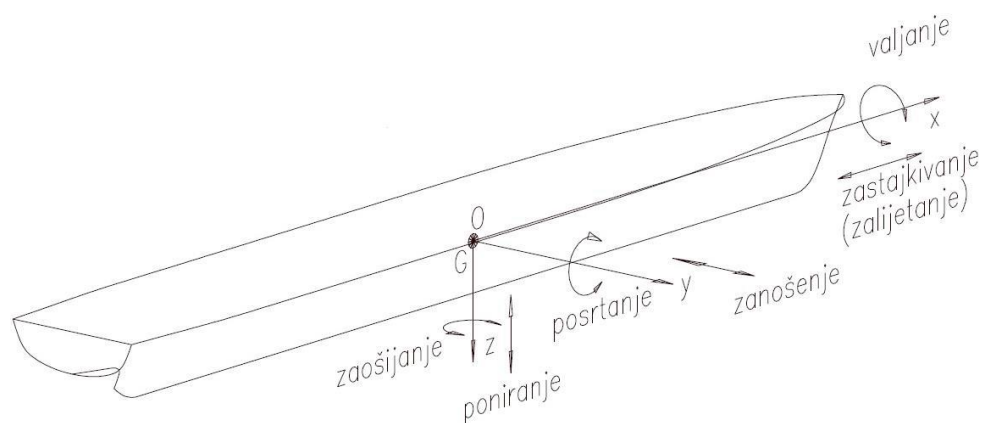
- Zalijetanje (eng. surge):  $x_1$  - pozitivno prema naprijed
- Zanošenje (eng. sway):  $x_2$  - pozitivno prema desno
- Poniranje (eng. heave):  $x_3$  - pozitivno prema dolje

#### 2.3.2. Rotacijska gibanja

Položaj broda definira se pomoću rotacijskih pomaka oko osi  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  koje prolaze kroz težište mase broda  $G$ , [2] :

- Ljuljanje (eng. roll):  $x_4$  - pozitivan nagib u desno
- Posrtanje (eng. pitch):  $x_5$  - pozitivno izranjanje pramca prema gore
- Zaošijanje (eng. yaw):  $x_6$  - pozitivno zanošenje prema pramcu u desno

Na slici 4. prikazano je svih 6 stupnjeva slobode gibanja:



Slika 4. Prikaz translacijskih i rotacijskih pomaka broda [2]

### 2.3.3 Koordinatni sustavi [1]

Da bi se opisalo djelovanje vala na brod te njihanje kao posljedica tog djelovanja, potrebno je definirati odgovarajuće koordinatne sustave

- Nepomični koordinatni sustav (fiksni ili inercijski)  $S(x_0, y_0, z_0)$  vezan je za Zemlju. Ravnina  $X_0Y_0$  leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi  $x_0$  je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os  $z_0$  usmjerena je vertikalno prema gore.
- Koordinatni sustav broda  $G(x_b, y_b, z_b)$  vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda  $G$ . Os  $x_b$  leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda, odnosno u smjeru napredovanja. Os  $y_b$  usmjerena je prema lijevom boku broda, dok je os  $z_b$  okomita na ravninu  $X_bY_b$  s pozitivnim smjerom prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina  $X_bY_b$  paralelna je s mirnom slobodnom površinom.
- Translatirajući koordinatni sustav  $O(x, y, z)$  kreće se brzinom broda  $U$ . ako brod miruje smjerovi osi koordinatnog sustava  $O(x, y, z)$  jednaki su onima kod koordinatnog sustava broda  $G(x_b, y_b, z_b)$ . Ravnina  $XY$  leži na mirnoj slobodnoj površini

## 2.4. Dinamička ravnoteža njihanja [1]

Problem njihanja broda na valovima može se u linearnoj teoriji prikazati preko dva neovisna problema:

- problem njihanja tijela na mirnoj slobodnoj površini
- problema djelovanja valova na nepomično tijelo

Tijelo koje se njiše na valu u svakom je trenutku u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i promjenjive hidrostatičke sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase tijela. Dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidromehaničkih i uzbudnih sila

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} = Re\{\zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}\} \quad (2.7)$$

Uz pretpostavku harmonijskog gibanja dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom algebarskih jednadžbi:

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{i\omega t} = \zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

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

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\} = \zeta_a\{F_j\} \quad (2.9)$$

$[M_{jk}]$  - matrica mase tijela

$[A_{jk}]$  - matrica pridruženih masa

$[B_{jk}]$  – matrica hidrodinamičkog prigušenja

$[C_{jk}]$  - matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila

## 2.5. Linearna teorija valova

Linearna teorija valova je najjednostavnija teorija male amplitude progresivnog površinskog vala. Model harmonijskog progresivnog vala je najjednostavniji model koji objašnjava strujanje i sve pojave u valu. Linearnom teorijom moguće je odrediti kinematičke i dinamičke značajke dvodimenzijskih površinskih valova i omogućuje razumijevanje fizikalnih svojstava i zakonitosti gibanja izdvojenog vala.

Strujanje fluida u potencijalnoj teoriji je bezvrtložno, odnosno ne postoji rotacija čestica. Uvjet bezvrtložnosti zadovoljen je ako je međusobni odnos promjena komponentu brzine strujanja  $\mathbf{v}$  ( $u, v, w$ ) u prostoru takav da je

$$\text{rot } \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v} = 0 \quad (2.10)$$

gdje je  $\mathbf{v}$  brzina strujanja fluida.

Da bi opisali polje brzina koristimo skalarnu funkciju potencijala brzine strujanja  $\Phi(x, y, z; t)$  koja je neprekinuta i konačne veličine u svakoj točki domene tekućine koja određuje vektor brzine strujanja  $\mathbf{v}$  u tekućini

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(x, y, z; t) &= \text{grad} \Phi(x, y, z; t) = \nabla \cdot \Phi(x, y, z; t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{k} \\ &= v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Odnos između funkcije potencijala brzine  $\Phi$  i strujne funkcije  $\Psi$  prikazuje se kao Cauchy-Riemanov odnos:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$$



Izraz vrijedi za dvodimenzionalno strujanje tj. kada je  $v_z = 0$ , strujnica je krivulja za koju vrijedi da je  $\Psi = \text{const}$ . Kontinuitet mase fluida definirana je zakonom o očuvanju mase tj. jednadžbom kontinuiteta.

Nestlačivost idealnog fluida omogućuje pretpostavku da je ukupna promjena protoka unutar određenog elementarnog volumena jednaka nuli. Količina idealnog fluida koja je ušla u elementarni volumen mora iz njega i izaći. Jednadžba kontinuiteta određuje se na temelju sume protoka fluida u sva tri smjera elementarnog volumena. [1]

Jednadžba kontinuiteta homogenog nestlačivog fluida poznata je kao Laplaceova jednadžba:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.13)$$

ili

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \Delta \Phi = 0 \quad (2.14)$$

Eulerova i Bernoullijeva jednadžbe su temeljne jednadžbe u linearnoj teoriji valova.

Eulerova jednadžba označava ravnotežu sila na materijalnoj čestici.

Eulerova jednadžba glasi:

$$\nabla p = \rho \frac{D}{Dt} \mathbf{v} \quad (2.15)$$

I jednaka je umnošku mase diferencijalnog volumena te ubrzanja čestice u definiranom smjeru. Bernoullijeva jednadžba označava zakon očuvanja energije strujanja po jedinici mase fluida. Bernoullijeva jednadžba glasi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.} \quad (2.16)$$

gdje je:

z-geodetska visina

g-ubrzanje zemljine sile teže

U slučaju nestacionarnog strujanja gornja jednačba (2.16) ovisna je isključivo o vremenu:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (2.17)$$

## 2.6. Potencijalna teorija

Potencijalno strujanje je neviskozno, nestlačivo i homogeno te se pretpostavlja da u fluidu nema kavitacijskih mjehurića plina. Teorija potencijalnog strujanja koristi se da bi se odredila svojstva valova te procijenila njihanja i opterećenja plovniha objekata. Potencijal brzine strujanja harmonijskog vala mora zadovoljiti četiri uvjeta:

1. Uvjet kontinuiteta ili Laplaceova jednačba u području fluida prema kojoj je divergencija vektora brzine u bilo kojoj točki fluida jednaka nuli

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} \quad (2.18)$$

2. rubni uvjet nepromočivosti na dnu određuje da je vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka nuli

$$w = v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

$$\text{za } z = -d$$

3. Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini koji vrijedi na valovitoj slobodnoj površini i određuje da je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom tlaku:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad (2.20)$$

$$\text{za } z = \zeta$$

4. Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini koji određuje da je vertikalna komponenta brzine čestice fluida na slobodnoj površini jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2.21)$$

$$\text{za } z = \zeta$$

ukoliko se zadovolje navedeni uvjeti moguće je izraziti potencijal brzine strujanja valova u vodi ograničene dubine:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g \cdot \cosh k(d+z)}{\omega \cdot \cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (2.22)$$

gdje je:

$\zeta_a$  - valna amplituda

$\omega$  - valna frekvencija

$k$  - valni broj

$d$  - dubina

U dubokoj vodi gdje je  $d \rightarrow \infty$  izraz  $\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$  u jednadžbi (2.22) poprima oblik  $e^{kz}$ .

## 2.7. Trodimenzionalna metoda rubnih elemenata

Trodimenzionalna metoda rubnih elemenata temelji se na principu Greenova integralnog teorema kako bi predvidjela hidrodinamičke koeficijente, sile i gibanja broda na valovima za svih 6 stupnjeva slobode gibanja. Također se koristi 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 gibanja.

Prema Greenovu teoremu moguće je transformirati trodimenzionalnu linearnu homogenu diferencijalnu jednadžbu u dvodimenzionalnu integralnu jednadžbu te na taj način trodimenzionalna Laplaceova (potencijalna) jednadžba transformira se u površinsku integralnu jednadžbu. Površina tijela je podijeljena na  $N$  panela dovoljno malenih da se može pretpostaviti da su izvori(ponori), snaga potencijalnog strujanja uzrokovana izvorom konstantni po cijeloj površini svakog elementa.

Prednost ove metode je ta da je problem reduciran na dvodimenzionalni (površinski) problem. Panel metoda je tehnika koja se koristi najčešće za analizu linearnog odziva stabilnog stanja velikih volumenskih struktura na valovitom moru.

## 2.8. Odziv broda na morskim valovima

Spektar gustoće energije valnih amplituda određuje odziv broda na valovima. Spektar valova pokazuje važnost te pojavljivosti komponenti pravilnih valova koji po principu superpozicije stvaraju nepravila val. Valni spektar nam omogućuje približan matematički opis valova, iako je profil morskih valova nepravilan. Nepravilnost vala čini prelamanje valova iz više smjerova, valovi nastali uslijed refleksije od obale te valovi mrtvog mora nastali na nekom drugom mjestu. Poznavanje funkcije gustoće spektra valova osnova je za projektiranje opterećenja brodskih i pomorskih konstrukcija.

Energija valne amplituda tj. spektar energije valova  $S_{\zeta}(\omega)$  ovise o kvadratu amplitude vala na određenoj frekvenciji te se definira kao:

$$S_{\zeta}(\omega)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_a^2(\omega) \quad (2.23)$$

Moguće je spektar energije valova  $S_{\zeta}(\omega)$  odrediti na osnovi mjerenja, ali često se koristi neki od idealiziranih teorijskih spektra valova. Idealizirani teorijski spektri valova opisani su malim brojem parametara ili karakterističnih veličina slučajnog stanja mora. Karakteristične veličine spektra valova su značajna valna visina tj. srednja vrijednost trećine najviših valnih visina i nulti valni period .

Razlikujemo susretni spektar energije valova  $S_{\zeta}(\omega_e)$  i spektar energije valova  $S_{\zeta}(\omega)$ , jer nemaju isti oblik i obuhvaćaju različiti frekvencijski raspon.

Susretni spektar valova obuhvaća raspon frekvencija kojima je brod izložen, a valni spektar obuhvaća raspon frekvencija valova. Površine ispod krivulja jednog i drugog spektra moraju biti jednake zato što se energija valova ne mijenja.

Spektar odziva broda moguće je odrediti ako je poznat valni spektar prijenosne funkcije tog odziva. Spektar odziva se određuje:

$$S_{R\zeta}(\omega_e) = RAO \cdot S_{\zeta}(\omega_e) = |H_{R\zeta}(\omega_e)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e) = \left| \frac{R_a(\omega_e)}{\zeta_a} \right|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e) \quad (2.24)$$

### 2.8.1. Prijenosna funkcija

Najbolji način za prikazivanje odziva plovnog objekta na harmonijskim valovima različitih frekvencija je prijenosna funkcija  $H_{Ra}$  odnosno operator amplitude odziva RAO (eng. response amplitude operator). Operator RAO prikazuje omjer amplitude odziva  $R_a$  i amplitude vala  $\zeta_a$  odnosno kvadrat toga omjera

$$RAO = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{Ra}^2 \quad (2.25)$$

### 2.8.2 Tabainov spektar valova

U proračunu je korišten Tabainov spektar valova za Jadransko more.

Tonko Tabain je proveo neprekinuto eksperimentalno istraživanje vjetrom nastalih valova na Jadranskom moru. Istraživanje je počelo 1967., a završilo je 1977. godine, a provedeno je u svrhu prikupljanja informacija o odnosu brzine vjetra i značajne valne visine radi određivanja projektnog spektra valova pri projektiranju ratnih brodova. Istraživanje je rezultiralo skalom stanja mora 1974. i empirijskom formulom spektra 1977. godine. Usporedbom s drugim autorima te nakon mnogobrojnih primjena formule u projektiranju brodova i inženjerstvu morske tehnologije ustanovljeno je da formula daje dobre rezultate pri opisu izmjerenih spektra valova.[1]

Tabainov spektar:

$$S_{\zeta}(\omega) = 0.862 \cdot \frac{0.0135g^2}{\omega^5} \cdot \exp\left(-\frac{5.186}{\omega^4 H_1^{\frac{1}{3}}}\right) \cdot 1.63^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_e)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}\right)} \quad (2.26)$$

gdje je modalna frekvencija  $\omega_m$  vezana za značajnu valnu visinu na način:

$$\omega_m = 0.32 + \frac{1.80}{H_1 + 0.60} \quad (2.27)$$

Parametar  $\sigma$  može poprimiti vrijednosti:

$$\sigma = 0.08 \quad \text{za} \quad \omega < \omega_m$$

$$\sigma = 0.10 \quad \text{za} \quad \omega > \omega_m$$

### 3. PRORAČUN ODZIVA ZADANE FORME BRODA ZA SVIH 6 STUPNJEVA SLOBODE GIBANJA

Za proračun odziva broda na valovima za svih 6 stupnjeva slobode gibanja korišten je programski paket HydroStar.

#### 3.1. Princip rada programskog paketa HydroSTAR

Programski paket HydroStar temelji se na panelnoj metodi i teoriji potencijalnog strujanja. Teorija potencijalnog strujanja omogućuje izračun sila prvog i drugog reda na temelju karakteristika modela i ulaznih parametara valova. Omogućuje izračun difrakcijske i radijacijske komponente dodatnog otpora broda, interakciju broda i valova te međudjelovanje više tijela. S obzirom da se *software* temelji na potencijalnom strujanju koje predviđa rezonantno gibanje valova bez ograničenja dodaje se fiktivna sila u momentnim jednadžbama dinamičke ravnoteže kako bi se u obzir uzelo prigušenje.


#### 3.2. Priprema podataka za HydroSTAR

Formu broda bilo je potrebno napraviti u programu HydroSTAR koji služi za modeliranje 3D struktura. Zadana forma broda bila je napravljena u AutoCadu te je podjeljena na 68 rebara, a za izračun i prilagođavanje ulaznih podataka korišten je program Excell.

Nakon definiranja svih točaka rebara, bilo je potrebno pripremiti podatke za unos u program HydroSTAR. Sve podatke je trebalo prebaciti u Notepad u odgovarajući oblik prema odredbama samog programa za generiranje modela. U programu HydroSTAR je forma generirana na način da se unesu koordinate rebara, gaz i trim modela. Osim toga definirani su i podaci o masi, položaju težišta modela te radijusima tromosti mase oko težišta. Nakon što je forma definirana program generira mrežu panela do vodne linije.

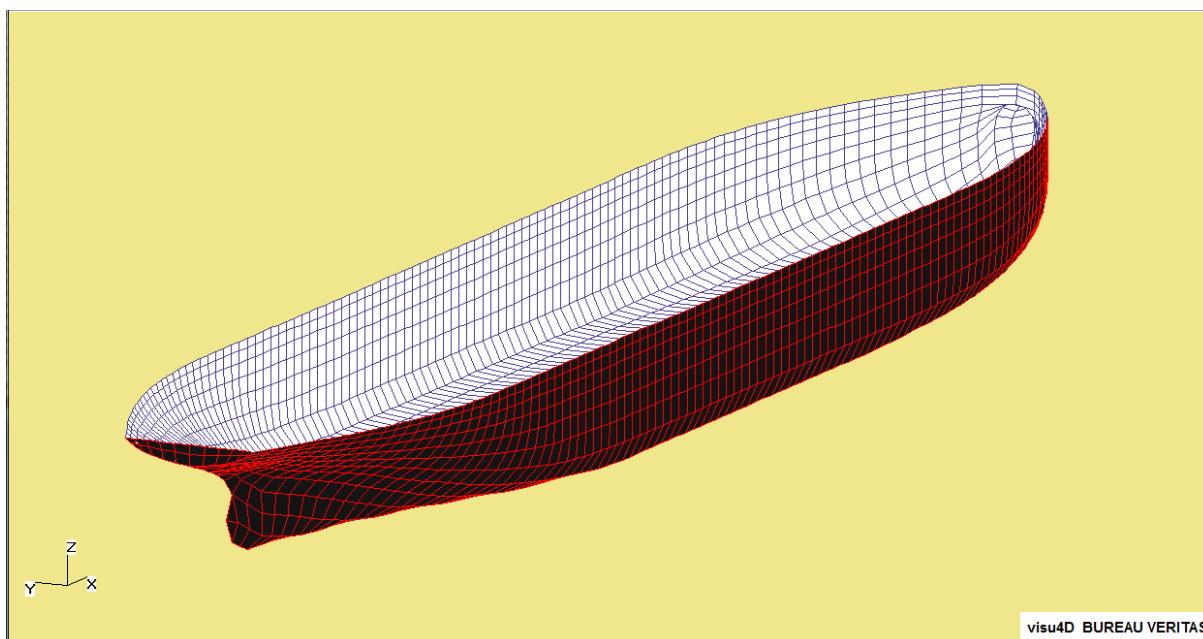
Na slici 5. prikazani su podaci broda



	<b>BRODARSKI INSTITUT ZAGREB</b>	Čimbenik: <b>6454 - M</b>	Stranica/Page: <b>6</b>
<b>H I D R O S T A T S K I   P O D A C I</b> -----			
Model: G-455		Mjerilo: 28.813	
		BROD	MODEL
Duljina između okomica	174.80 m	6.0667 m	
Duljina na vodnoj liniji	178.40 m	6.1917 m	
Sirina na srednjem presjeku	32.20 m	1.1176 m	
Najveća sirina vodne linije	32.20 m	1.1176 m	
Sirina na najvećem presjeku	32.20 m	1.1176 m	
Gaz na pramcu	12.90 m	0.4477 m	
Gaz na krmi	12.90 m	0.4477 m	
Gaz na srednjem presjeku	12.90 m	0.4477 m	
Gaz na najvećem presjeku	12.90 m	0.4477 m	
Površina srednjeg presjeka	413.48 m <sup>2</sup>	0.4981 m <sup>2</sup>	
Površina najvećeg presjeka	413.56 m <sup>2</sup>	0.4982 m <sup>2</sup>	
Površina vodne linije	5136.4 m <sup>2</sup>	6.1870 m <sup>2</sup>	
Oplakana površina golog trupa	8749.3 m <sup>2</sup>	10.5389 m <sup>2</sup>	
Gustoca vode	1.026 t/m <sup>3</sup>		
Volumen istisnine	59287. m <sup>3</sup>	2.4785 m <sup>3</sup>	
Masa istisnine golog trupa	60829. t		
Uzdunji položaj težišta istisnine *)	2.54 m	0.0882 m	
Uzdunji položaj težišta istisnine *)	1.453 %Lpp		
Vertikalni položaj težišta istisnine	6.74 m	0.2341 m	
<b>KOEFICIJENTI I OMJERI</b> -----			
Koeficijent punoce vodne linije		0.8941	
Koeficijent punoce srednjeg presjeka		0.9954	
Koeficijent punoce najvećeg presjeka		0.9956	
Koeficijent punoce forme		0.8165	
Prizmatički koeficijent		0.8201	
Vertikalni prizmatički koeficijent		0.8948	
Froudeov koeficijent duljine (M)		4.4828	
Froudeov koeficijent oplakane površine (S)		5.7544	
Omjer duljine i sirine na WL		5.5402	
Omjer sirine na WL i gaza na sredini		2.4963	
-----			
*) (+) od srednjeg presjeka prema pramcu			

Slika 5. Podaci broda

Na slici 6. prikazana je mreža panela do vodne linije.



Slika 6. Mreža panela do vodne linije u programu HydroSTAR

Kada je napravljena forma u programu, karakterističnim naredbama za program HydroSTAR napravljen je proračun za elementarna rješenja uključujući dodatne mase, prigušenje radijacije i uzbude opterećenja. Zatim proračun gibanja plutajućeg objekta, proračun prijenosnih funkcija gibanja, brzina, ubrzanja i opterećenja drugog reda.

Nakon izvršenog proračuna izračunate su funkcije gustoće spektra energije valova za zadane značajne valne visine, koristeći Tabainov spektar za Jadransko more te su očitane su vrijednosti prijenosne funkcije za sve kuteve nailaska broda na valove te uvrštene u daljnji proračun koji se temeljio na proračunu funkcije spektra odziva broda za svih 6 stupnjeva slobode gibanja.

### 3.3. Tabainov spektar valova za značajne valne visine

Zadatak je bio proračunati funkcije odziva broda za 2 značajne valne visine pomoću Tabainovog spektra za Jadransko more.

Vrijednosti značajnih valnih visina:

$$H_{1/3} = 7.20m$$

$$H_{1/3} = 8.57m$$

Spektar valova izračunat je pomoću slijedećih formula:

$$S_{\eta} = 0.862 \cdot \frac{0.0135g^2}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5.186}{\omega^4 H_s^2}\right)} \cdot 1.63^p \quad (3.1.)$$

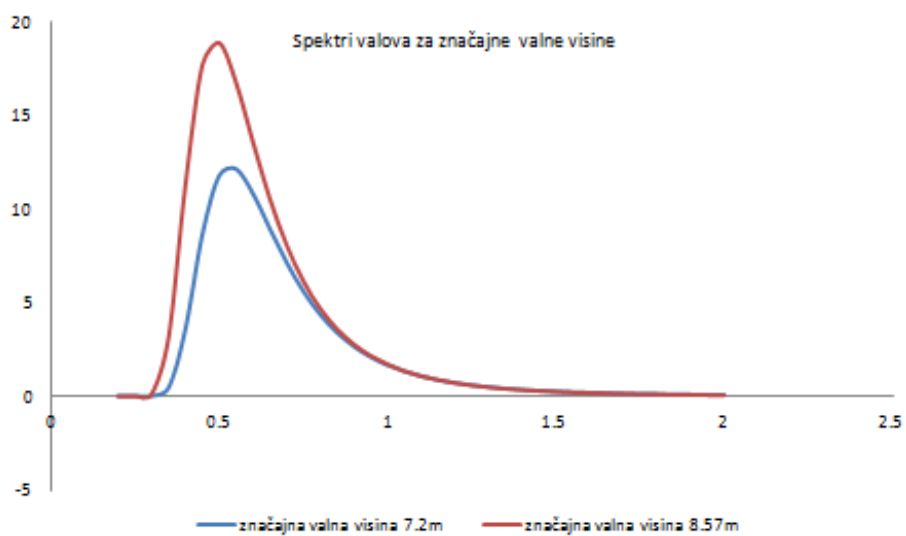
gdje je:

$$p = e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}\right)} \quad (3.2)$$

$$\omega_m = 0.32 + \frac{1.8}{H_s + 0.60} \quad (3.3)$$

$$\sigma = 0.08 \text{ za } \omega \leq \omega_m, \quad \sigma = 0.1 \text{ za } \omega > \omega_m$$

Koristeći navedene formule izračunati su spektri valova za dvije značajne valne visine te su prikazani slikom 7.



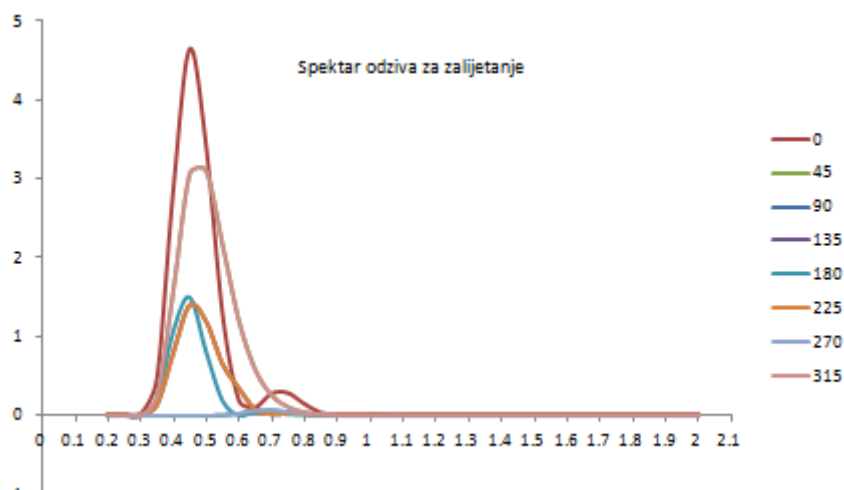
Slika 7. Spektri valova za zadane značajne valne visine

### 3.4. Prikaz dobivenih rezultata za odziv broda na valovima

Pomoću dobivenih amplituda odziva na temelju prijenosnih funkcija napravljen je proračun odziva broda na morskim valovima za definirana stanja mora. Da bi se dobio operator RAO bezdimenzionalna amplituda odziva je za svaku pojedinu frekvenciju kvadratirana te je pomnožena sa spektrom tj. valnom energijom sadržanoj u komponenti vala koja odgovara istoj frekvenciji.

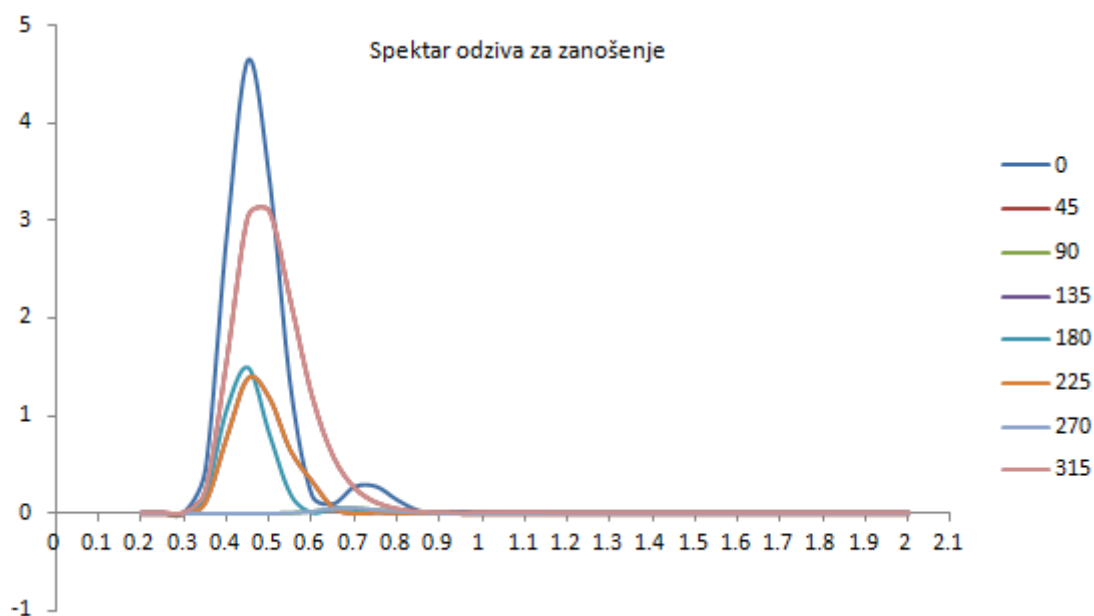
#### 3.4.1. Prikaz dobivenih rezultata za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Prilikom proračuna odziva broda za značajnu valnu visinu u obzir je uzeto 8 kuteva nailaska borda na valove, što je vidljivo u prikazu dobivenih rezultata.



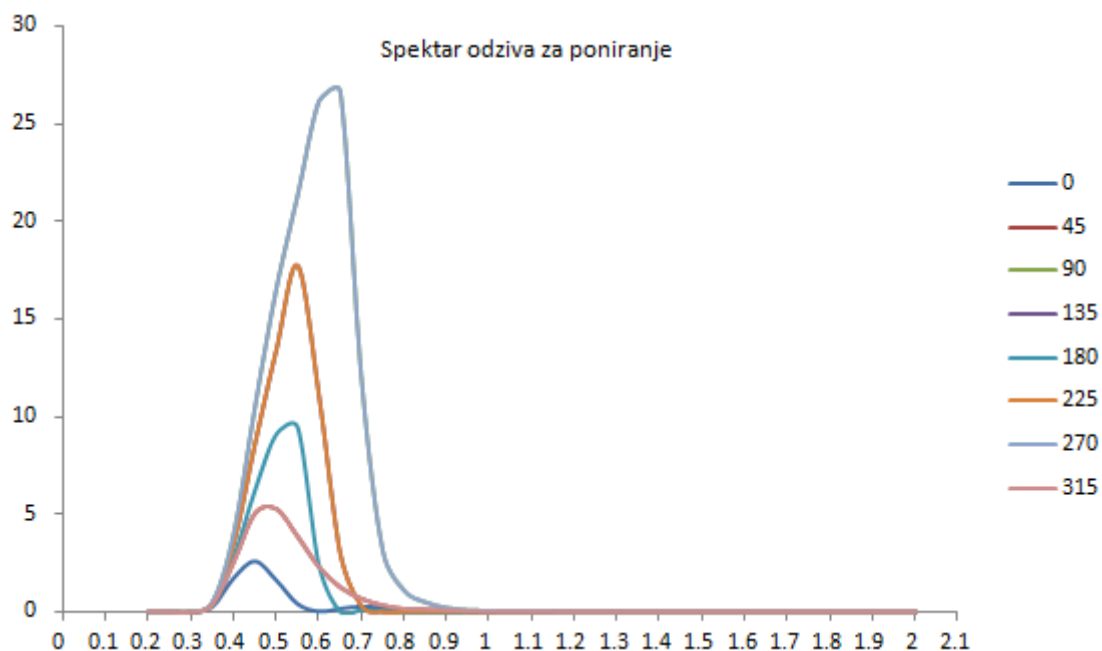
Slika 8. Spektar odziva za zalijetanje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Slika 8. prikazuje dobivene rezultate za spektar odziva za zalijetanje, prilikom nailaska broda na valove. Dobiveni rezultati prikazuju da funkcija spektra odziva postiže svoje maksimalne vrijednosti pri frekvenciji od 0.45 rad/s za kutove od 0, 180, 225, 315, dok pri ostalim kutovima nailaska broda na valove odziv nije značajan.



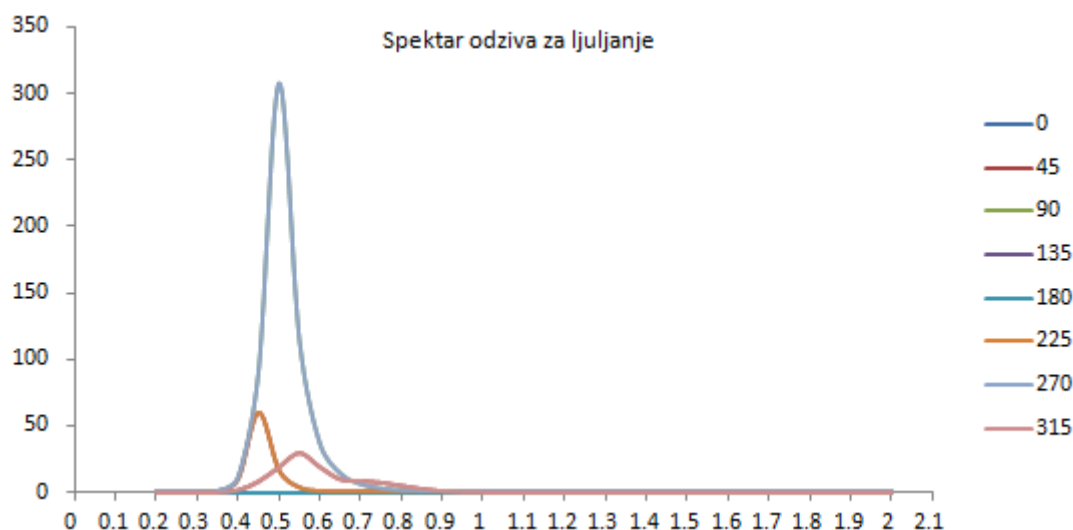
Slika 9. Spektar odziva za zanošenje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Slika 9. prikazuje dobivene rezultate za spektar odziva za zanošenje. Najveći odziv prilikom zanošenja postiže se pri nailasku broda na valove pri 0 stupnjeva, dakle nailaskom valova u krmu broda za frekvenciju od otprilike 0.45 rad/s. Pri udaranju valova pod kutem od 315 stupnjeva odziv je nešto manji od odziva prilikom nailaska valova pod kutem od 0 stupnjeva, ali svoj maksimum postiže pri većoj frekvenciji 0.5 rad/s.



Slika 10. Spektar odziva za poniranje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Slika 10. prikazuje dobivene rezultate za spektar odziva za poniranje. Prilikom poniranja broda, maksimalni odziv se postiže pri nailasku broda na val pod kutem od 270 stupnjeva i to pri frekvenciji od 0.65 rad/s. Pri nešto nižoj frekvenciji od oko 0.57 rad/s maksimalan odziv se postiže za nailazni kut valova na brod od 225 stupnjeva. Prilikom nailaska broda na valove pod kutem od 180 stupnjeva maksimalni odziv se postiže pri frekvenciji od 0.55 rad/s. Pri frekvenciji od oko 0.485 rad/s odziv je maksimalan za nailazni kut valova od 315 stupnjeva, dok je pri frekvenciji od 0.45 rad/s maksimalan odziv za valove koji nailaze pod kutem od 0 stupnjeva odnosno za valove koji idu u krmu broda.

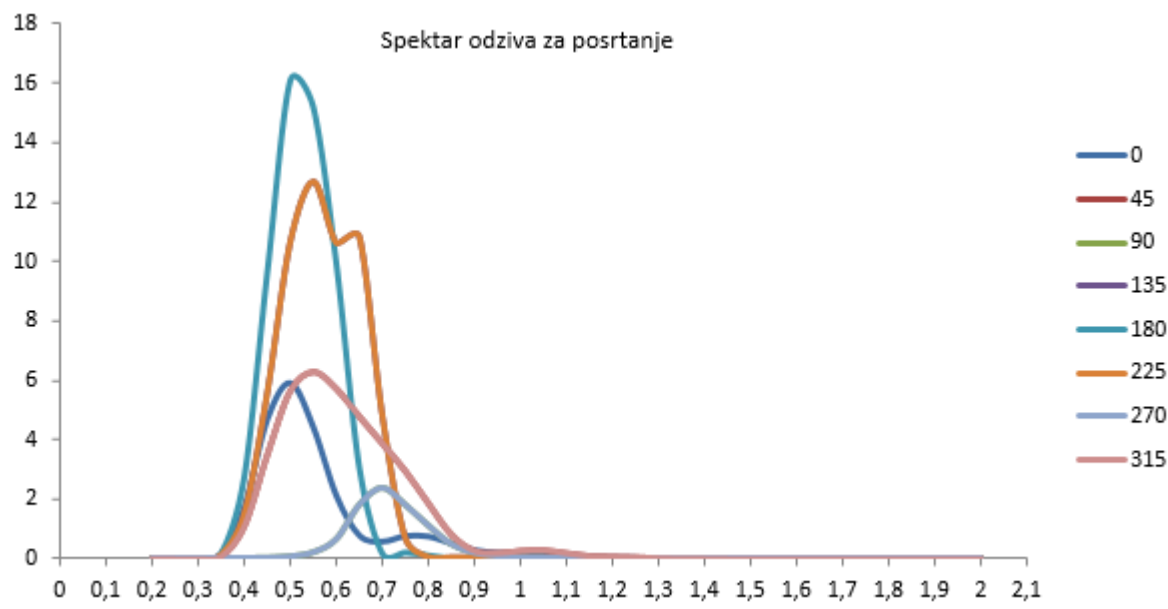


Slika 11. Spektar odziva za ljuljanje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Slika 11. prikazuje spektar odziva za ljuljanje. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se najveći odziv postiže pri nailasku valova u bok broda i to pri 270 stupnjeva.

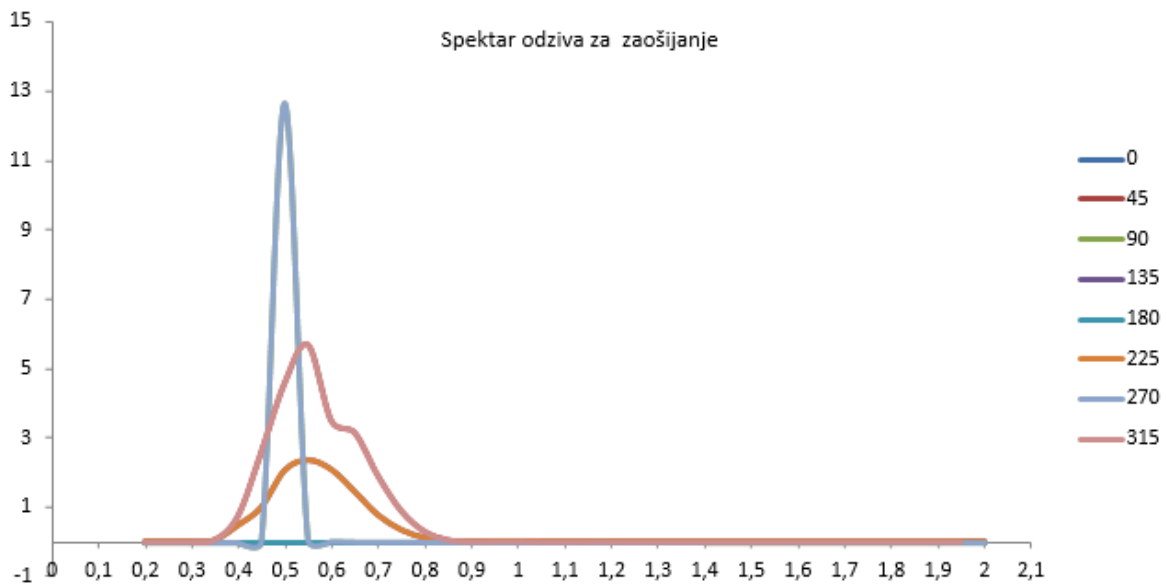
Prilikom računanja spektra odziva za ljuljanje uvršteno je prigušenje u iznosu od 8% kritičnog prigušenja kako bi se odziv smanjio. Pojava velikog odziva prilikom ljuljanja i potreba uvođenja prigušenja, posljedica je teških vremenskih uvijeta za kojih brod plovi te pojave velikih torzionih momenata koji izazivaju ljuljanje. Stabilnost broda se povećava kada brod plovi uzdužno na val, dok se smanjuje kada se brod nađe na vrhu vala. Ukoliko se ova oscilacija mijenja pojavljuje se dvostruki prirodni period ljuljanja, zbog čega se moment ljuljanja može značajno povećati. Značajno povećanje ljuljanja može se promatrati kada se brod susreće sa valovima čija je frekvencija približno dvostruka prirodnim frekvencijama ljuljanja te kad moment ljuljanja nastane u vremenskom intervalu između brijega i dola vala.





Slika 12. Spektar odziva za posrtanje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

Slika 12 prikazuje spektar odziva za posrtanje. Prilikom nailaska broda na valove koji idu u pramac, odnosno nailaze pod kutom od 180 stupnjeva, odziv broda je maksimalan i to pri frekvenciji od 0.5 rad/s. Valovi koji nailaze na brod pri kutom od 225 stupnjeva postižu maksimalan odziv pri frekvenciji od oko 0.53 rad/s. maksimalan odziv za valove koji nailaze na brod pod kutom od 315 stupnjeva događa se pri frekvenciji od otprilike 0.55 rad/s. valovi koji dolaze na krmu broda pod kutom od 0 stupnjeva maksimalni odziv ostvaruju pri frekvenciji od 0.5 rad/s. Valovi koji dolaze brodu u bok, odnosno pod kutom od 270 stupnjeva postižu najveći odziv pri frekvenciji od 0.72 rad/s.

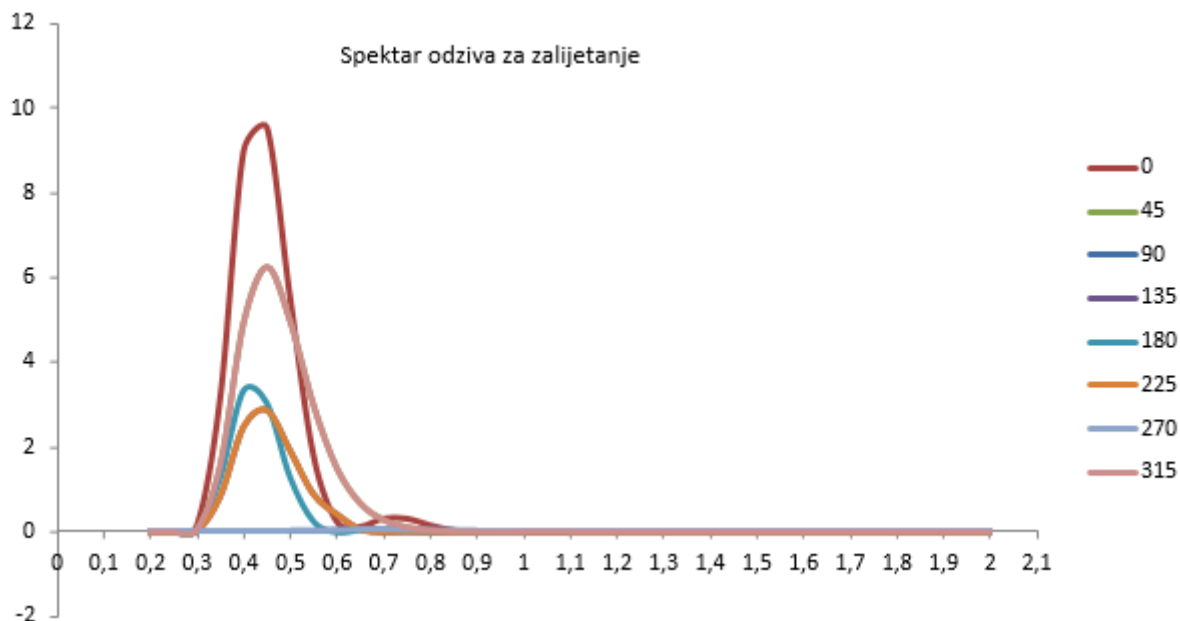


Slika 13. Spektar odziva za zaošijanje,  $H_{1/3} = 7.20\text{m}$

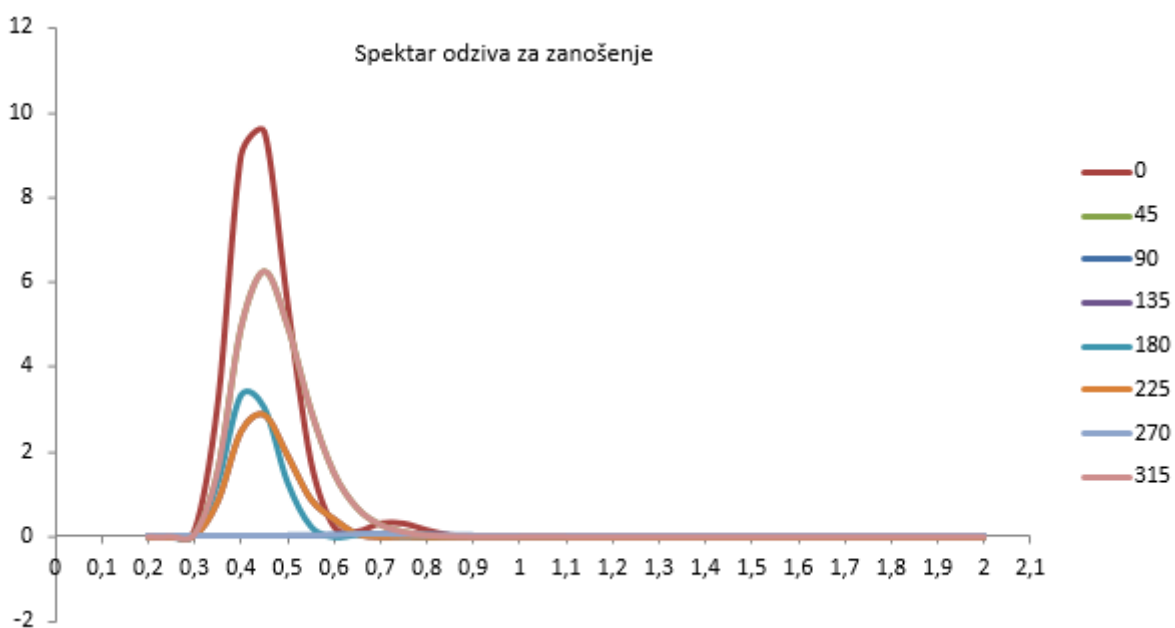
Slika 13. prikazuje spektar odziva za zaošijanje. Pri frekvenciji od 0.5 rad/s odziv je najveći za valove koji dolaze brodu u bok, odnosno pod kutom od 270 stupnjeva. Valovi koji dolaze pod kutem od 315 stupnjeva imaju najveći odziv pri frekvenciji od 0.55 rad/s, dok valovi koji nailaze na brod pod kutem od 225 stupnjeva imaju najveći odziv pri frekvenciji od 0.55 rad/s.

### 3.4.2. Prikaz dobivenih rezultata za značajnu valnu visinu $H_{1/3} = 8.57m$

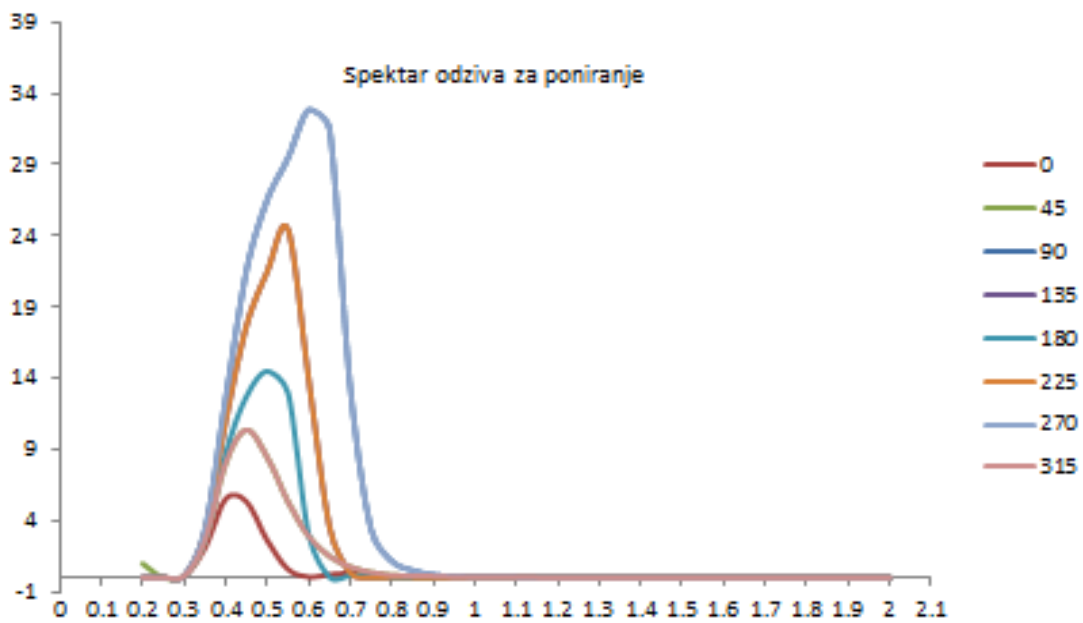
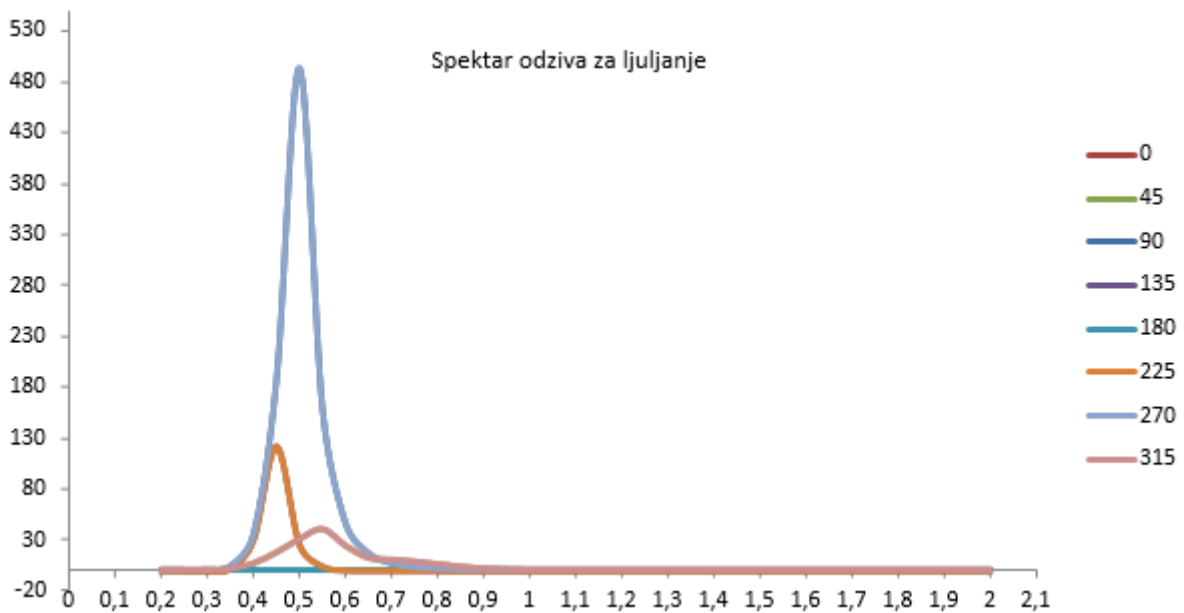
Prilikom proračuna odziva broda za značajnu valnu visinu u obzir je uzeto 8 kuteva nailaska borda na valove, što je vidljivo u prikazu dobivenih rezultata.

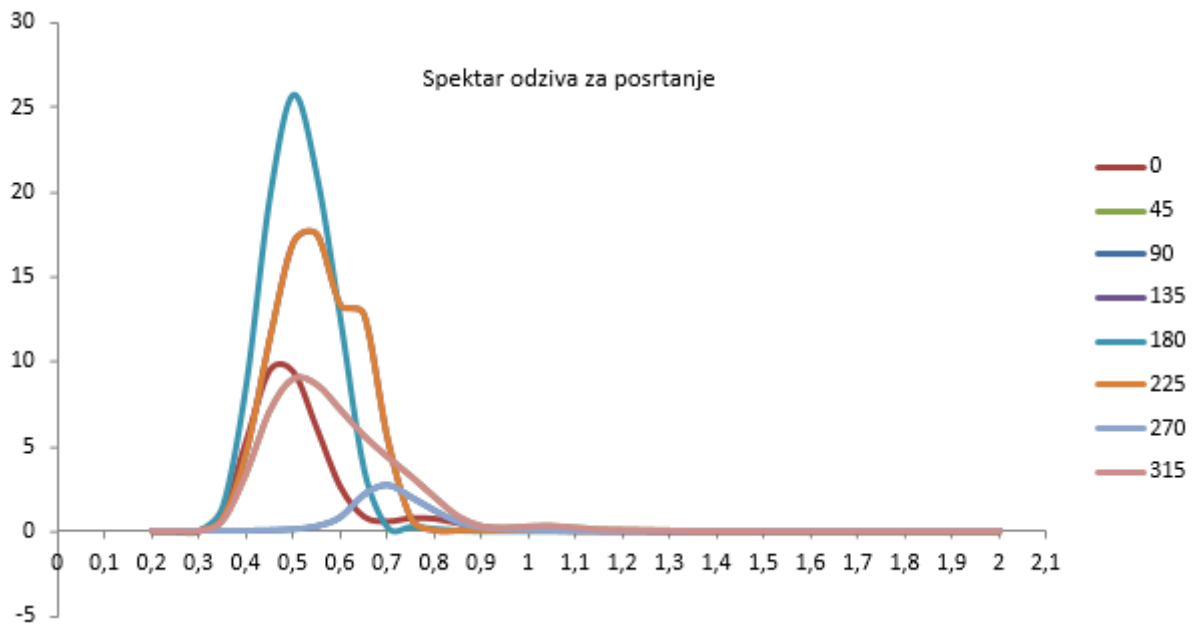
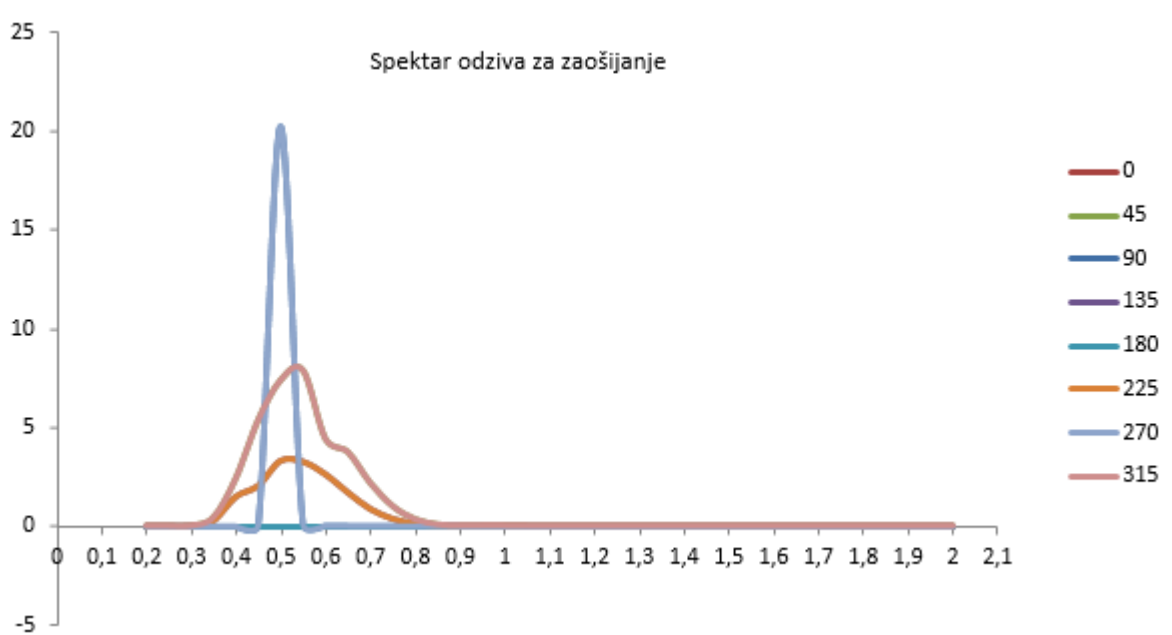


Slika 14. Spektar odziva za zalijetanje,  $H_{1/3} = 8.57m$



Slika 15. Spektar odziva za zanošenje,  $H_{1/3} = 8.57m$

Slika 16. Spektar odziva za poniranje,  $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ Slika 17. Spektar odziva za ljujanje,  $H_{1/3} = 8.57\text{m}$

Slika 18. Spektar odziva za posrtanje,  $H_{1/3} = 8.57\text{m}$ Slika 19. Spektar odziva za zaošijanje,  $H_{1/3} = 8.57\text{m}$

### 3.5. Značajne vrijednosti odziva

Značajna amplituda odziva računa se pomoću spektra energije odziva te je definirana kao srednja vrijednost jedne trećine najviših amplituda odziva, odnosno kao

$$R_{a1/3} = 2\sqrt{m_{0R}} \quad (3.4)$$

gdje je:

-  $m_{0R}$  nulti moment spektra

Nulti moment spektra računa se:

$$m_{0R} = \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (3.5)$$

Tablica 1. Značajne vrijednosti odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja za značajnu valnu visinu  $H_{1/3} = 7.20m$

smjer nailaska vala	značajna vrijednost odziva			7.20m		
	poniranje	posrtanje	ljuljanje	zalijetanje	zanošenje	zaošijanje
0	1,23	2,15	0,00	1,65	1,65	0,00
45	2,10	2,77	4,83	1,57	1,57	2,20
90	4,97	1,33	10,37	0,21	0,21	1,31
135	3,42	3,41	4,53	0,95	0,95	1,46
180	2,49	3,38	0,00	0,88	0,88	0,00
225	3,42	3,41	4,53	0,95	0,95	1,46
270	4,97	1,33	10,37	0,21	0,21	1,31
315	2,10	2,77	4,83	1,57	1,57	2,20

Tablica 2. Značajne vrijednosti odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja za značajnu valnu visinu  $H_{1/3} = 8.57m$

smjer nailaska vala	značajna vrijednost odziva			8.57m		
	poniranje	posrtanje	ljuljanje	zalijetanje	zanošenje	zaošijanje
0	1,85	2,79	0,00	2,45	2,45	0,00
45	2,87	3,28	5,71	2,16	2,16	2,67
90	1,86	1,42	13,23	0,23	0,23	1,66
135	1,38	4,11	6,50	1,38	1,38	1,78
180	1,15	4,31	0,00	1,38	1,38	0,00
225	1,38	4,11	6,50	1,38	1,38	1,78
270	1,86	1,42	13,23	0,23	0,23	1,66
315	1,09	3,28	5,71	2,16	2,16	2,67

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom završnom zadatku napravljen je proračun odziva broda na valovima za svih šest stupnjeva slobode gibanja – poniranje, posrtanje, zaošijanje, zalijetanje, ljuljanje i zanošenje. Zadani smjer nailaska broda na valove bio je za kutove od 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 te 315 stupnjeva.

Za proračun odziva broda korišten je *softwar* HydroSTAR koji proračun odziva broda na valovima temelji na potencijalnoj teoriji trodimenzionalne metode rubnih elemenata.

Nakon napravljenog proračuna odziva broda u HydroSTARu iz HydroSTARa su uzete vrijednosti amplituda odziva koje su korištene u daljnjem proračunu.

Pomoću spektara valova, u ovom slučaju Tabainov spektar valova, za zadane frekvencije i značajne valne visine, izračunate su funkcije spektra odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja i za sve kutove nailaska broda na valove.

Nakon izračunate funkcije spektra odziva za sve zadane frekvencije, izračunat je nulti spektralni moment pomoću kojega je dobivena značajna vrijednost odziva.

Na kraju su tablično prikazane značajne vrijednosti odziva za sve kutove nailaska broda na valove i za svih šest stupnjeva slobode gibanja broda.

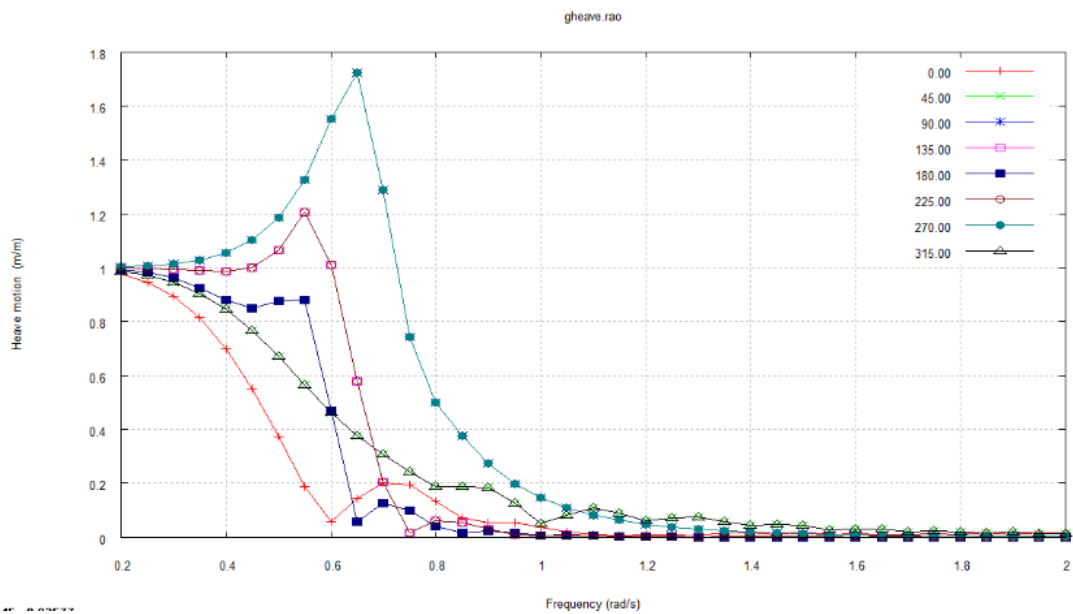
## **LITERATURA**

- [1] Ćorić V., Prpić-Oršić J.: " Pomorstvenost plovnih objekata", Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Rudan D.: " Uvod u hidrodinamiku broda", Sveučilište u Dubrovniku, 2004.

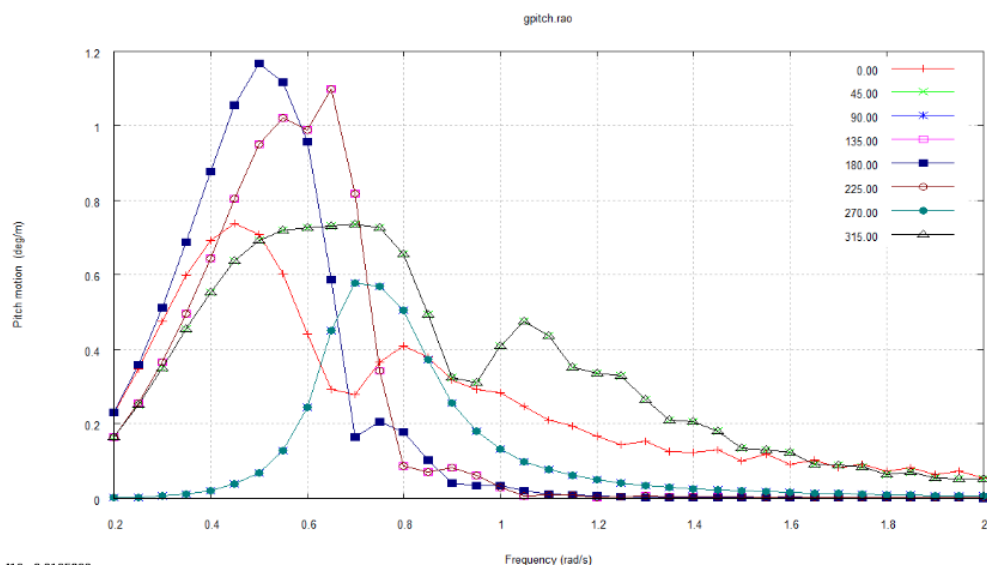


## PRILOG A

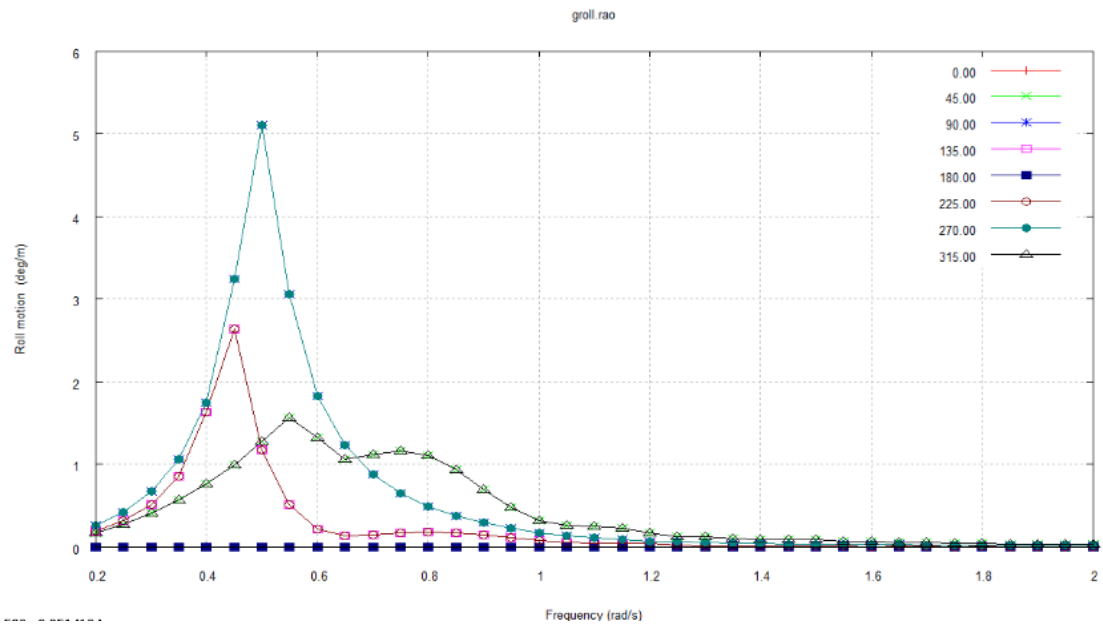
Nakon izvršenog proračuna odziva broda u programu HydroSTAR , pomoću naredbe hsplit dobiveni su grafovi prijenosnih funkcija odziva za svih 6 stupnjeva slobode gibanja:



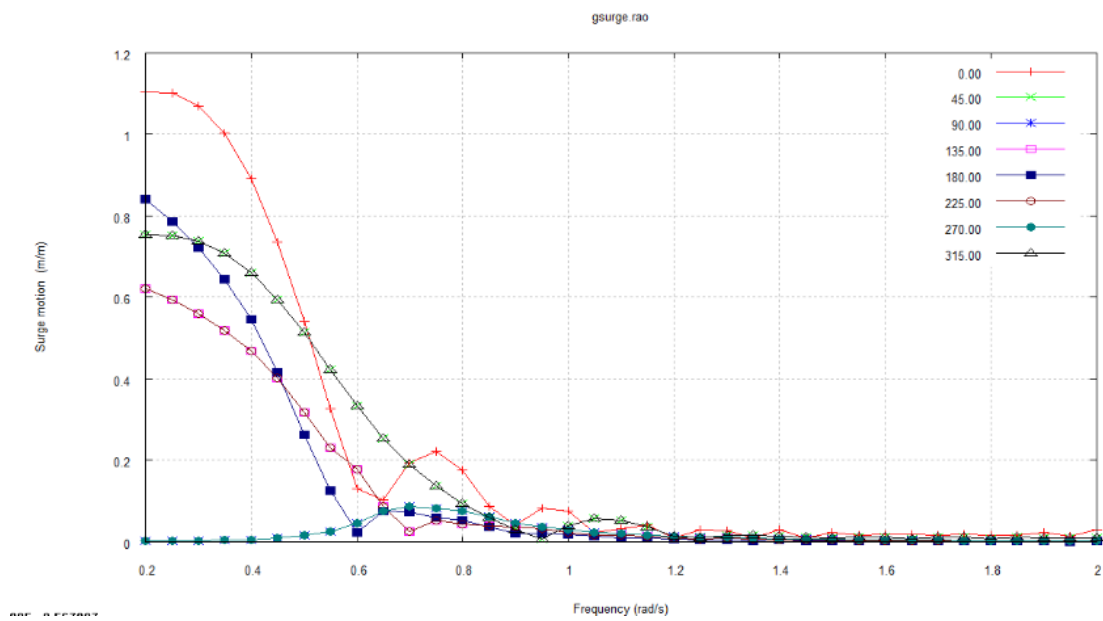
Slika 20. Prijenosna funkcija odziva za poniranje



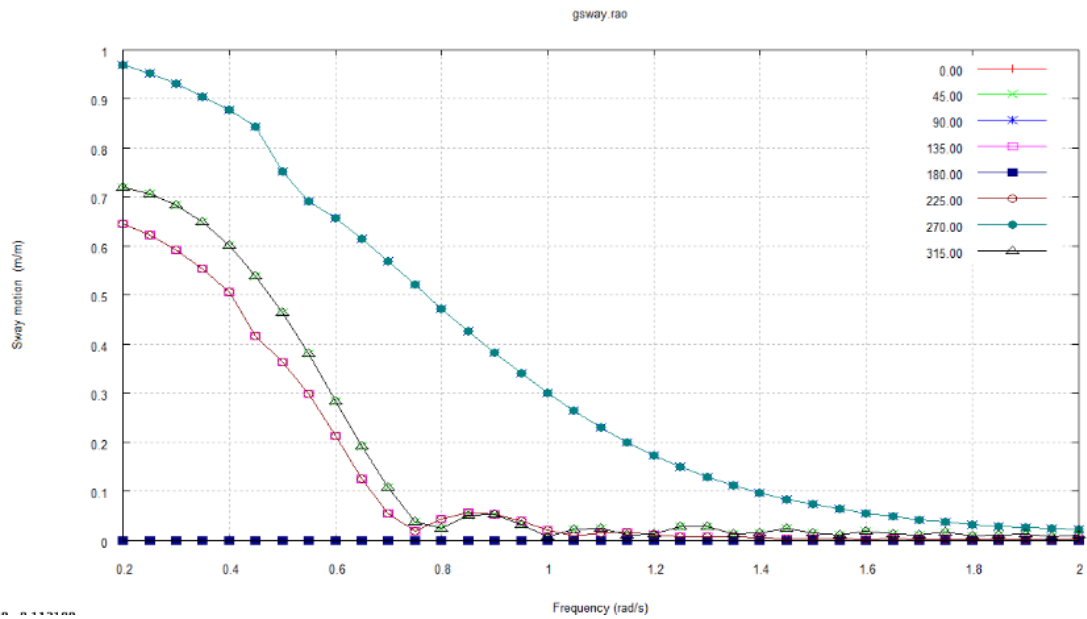
Slika 21. Prijenosna funkcija odziva za posrtanje



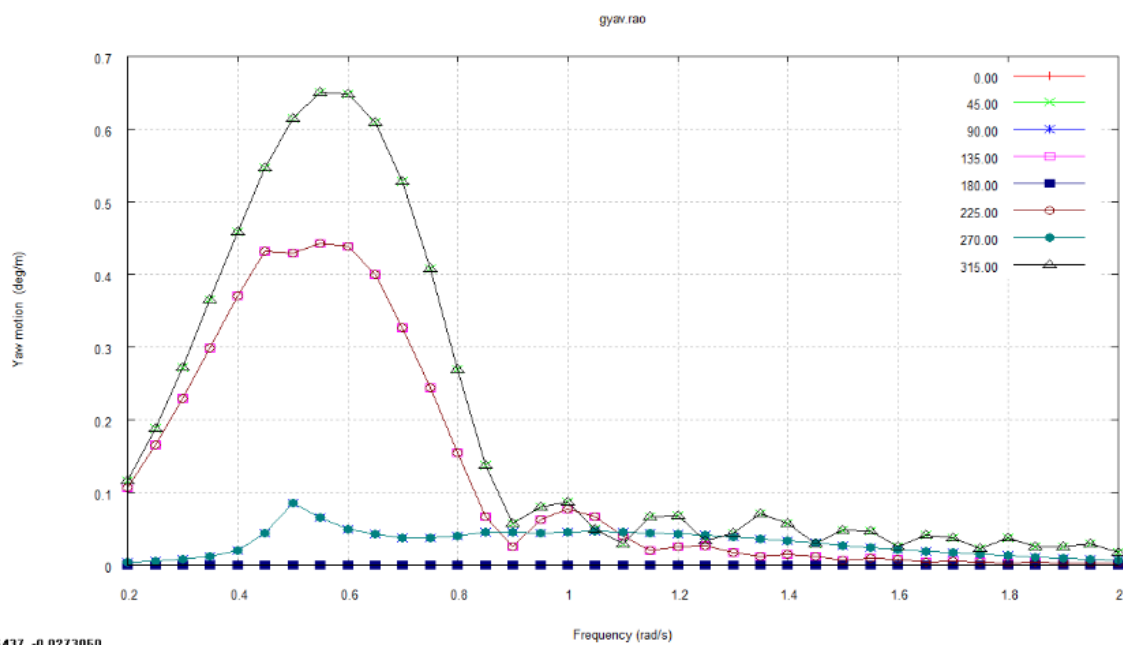
Slika 22. Prijenosna funkcija odziva za ljuljanje



Slika 23. Prijenosna funkcija odziva za zalijetanje



Slika 24. Prijenosna funkcija odziva za zanošenje



Slika 25. Prijenosna funkcija za zaošijanje