

Vertikalne vibracije kontejnerskog broda

Filipović, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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:235:556440>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Filipović

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Joško Parunov, dipl. ing.

Student:

Antonio Filipović

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Joško Parunov, na strpljivosti i razumijevanju tijekom pripreme i izrade rada. Svojim korisnim savjetima usmjeravao me rješenu problema i nedoumica s kojima sam se susretao.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima, bratu i sestrama na podršci i pomoći tijekom studiranja.

Antonio Filipović



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: **Antonio Filipović** Mat. br.: 0135201398

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **VERTIKALNE VIBRACIJE KONTEJNERSKOG BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **VERTICAL VIBRATION OF CONTAINERSHIP**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je dati kratak pregled problematike vibracija brodskog trupa. Pri tome se osvrnuti na vrste vibracija, metode analize i kriterije prihvatljivosti te načine određivanja parametara potrebnih za analizu vibracija. Koristiti upute klasifikacijskih društava vezano za vibracije broda. Nadalje je u uvodu potrebno opisati osnovne konstrukcijske značajke suvremenih kontejnerskih brodova kao i posljedice tih značajki na njihovo vibracijsko ponašanje.

U proračunskom dijelu rada treba analizirati vertikalne vibracije kontejnerskog broda koristeći 2D model konačnih elemenata. Principe modeliranja uzeti prema ref. I.Senjanović: „Vibracije broda III“. Analizirati slobodne vibracije te prisilne vibracije pobudene radom vijka. Uzbudne sile potrebne za analizu prisilnih vibracija odrediti empirijskim izrazima prema dostupnoj literaturi. Dodatnu masu odrediti metodom Šimanskog prema ref. I.Senjanović „Vibracije broda II“.

Prirodne frekvencije usporediti s 1D rezultatima dobivenim programom DYANA. Na osnovi rezultata slobodnih vibracija procijeniti opasnost od rezonancije globalnih vibracija i vibracija nadgrada. Amplitude prisilnih vibracija usporediti s kriterijima ISO 6954 (1984). Izvesti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:
14. studenog 2011.

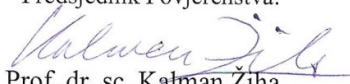
Rok predaje rada:
1. rok: 10. veljače 2012.
2. rok: 6. srpnja 2012.
3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 15., 16. i 17. veljače 2012.
2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.
3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Zadatak zadao:


Dr. sc. Joško Parunov

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Kalman Žiha

SADRŽAJ

SADRŽAJ	IV
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA	VI
POPIS DIJAGRAMA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	IX
1. KARAKTERISTIKE VIBRACIJA BRODSKOG TRUPA	13
1.1. Vrste vibracija brodske konstrukcije	13
1.2. Izvori vibracija, uzbuda	14
1.3. Odziv konstrukcije	14
1.3.1. Krutost brodske konstrukcije	15
1.3.2. Efektivna masa	15
1.3.3. Prigušenje	16
1.4. Kriterij prihvatljivost	16
1.5. Štetna djelovanja vibracija	18
1.6. Spriječavanje vibracija	18
1.7. Konstrukcijske značajke suvremenih kontejnerskih brodova i posljedice tih značajki na njihovo vibracijsko ponašanje	19
2. IZRADA MODELA	20
2.1. Podatci o brodu	Error! Bookmark not defined.
2.2. Ulazni parametri	21
2.3. Određivanje karakteristika konačnih elemenata	Error! Bookmark not defined.
3. REZULTATI ANALIZE	27
3.1. Rezultati slobodnih vibracija	27
3.2. Rezultati prisilnih vibracija	31
ZAKLJUČAK	32
LITERATURA	35

POPIS SLIKA

Slika 1.	ISO 6954 (1984).....	17
Slika 2.	Prikaz kontejnerskog broda Rigoletto	19
Slika 3.	2D model konačnih elemenata.....	24
Slika 4.	Prvi oblik vibriranja bez dodatne mase 2D modela	28
Slika 5.	Prvi oblik vibriranja bez dodatne mase 3D modela	28
Slika 6.	Drugi oblik vibriranja bez dodatne mase.....	29
Slika 7.	Drugi oblik vibriranja bez dodatne mase.....	29
Slika 8.	Prvi oblik vibriranja sa dodatnom masom.....	30
Slika 9.	Drugi oblik vibriranja sa dodatnom masom	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iznos dodatne mase za prvu prirodnu frekvenciju	25
Tablica 2. Usporedba prirodnih frekvencija 2D i 3D modela, f_i [Hz]	27
Tablica 3. Usporedba prirodnih frekvencija 2D i 1D modela, f_i [Hz]	27
Tablica 4. Usporedba prirodnih frekvencija 2D i 1D modela, f_i [Hz]	27

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Moment inercije i površina poprečnog presjeka

Dijagram 2. Raspodjela masa

Dijagram 3. Komponente brzina za čvorove 116 i 207

POPIS OZNAKA

A_1	$[m^2]$	površina štapa na mjestu dna
A_2	$[m^2]$	površina štapa na mjestu dvodna
A_3	$[m^2]$	površina štapa na mjestu neutralne osi
A_4	$[m^2]$	površina štapa na mjestu palube
A_5	$[m^2]$	površina štapa na mjestu flaže pražnice
t_6	$[m]$	debljina membrane između dna i pokrova dvodna
t_7	$[m]$	debljina membrane na mjestu struka pražnice
t_8	$[m]$	debljina membrane između neutralne linije i palube
t_9	$[m]$	debljina membrane između visine pokrova dvodna i neutralne linije
A	$[m^2]$	površina poprečnog presjeka
A_s	$[m^2]$	smična površina poprečnog presjeka
I_y	$[m^4]$	mometnt inercije poprečnog presjeka
A_{S0}	$[m^2]$	smična površina
H	$[m]$	visina broda
h_{db}	$[m]$	visina dvodna
h	$[m]$	visina pražnice
m_{vx}	$[t]$	dodatna masa po jedinici dužine trupa
ρ	$[t/m^3]$	gustoća vode
b	$[m]$	polovina ordinate plovne vodne linije na promatranom rebru
c_v		koeficijenti dvodimenzionalnog strujanja za vertikalne vibracije
K		korekcijski koeficijent trodimenzionalnog strujanja
α		faktor dinamičnosti
β		omjer uzbudne i pritodne frekvencije
ζ		veličina prigušenja

SAŽETAK

Vibracije broskog trupa, bilo globalne ili lokalne, mogu predstavljati značajan problem za nesmetan rad strojeva i posade na brodu. Da bi se predvidjelo dinamičko ponašanje brodske konstrukcije, potrebno je izvršiti analizu slobodnih i prisilnih vibracija trupa. Cilj ovog rada je analiza vertikalnih vibracija kontejnerskog broda pomoću 2D modela konačnih elemenata. U vodnom dijelu rada je prikazana problematika vibriranja broskog trupa, uzroci nastajanja vibracija i njihove posljedice na konstrukciju, strojeve, te posadu i putnike. Dan je pregled vrsta vibracija, parametara koji su potrebni za proračun vibracija, te metoda reduciranja vibracija na prihvatljivu razinu. U proračunskom dijelu rada prikazana je analiza slobodnih i prisilnih vibracija kontejnerskog broda. Opisani su ulazni parametri, rubni uvjeti i način određivanja uzbude za prisilne vibracije. Rezultati slobodnih vibracija dobiveni 2D modelom uspoređeni su s 1D rezultatima iz programa DYANA. Na kraju rada je dan zaključak o procjeni prihvatljivosti razine prisilnih vibracija prema ISO 6945 (1984) standardu.

1. KARAKTERISTIKE VIBRACIJA BRODSKOG TRUPA

Svako elastično tijelo je podložno vibracijama pa tako i brod. U većini slučajeva sve brodske vibracije ne uzrokuju nepovoljne efekte. Kada se kod brodova u službi nastupe problemi s vibracijama, oni se prvenstveno odnose na:

- neugodnosti za ljudski organizam, te smanjenom udobnost za posadu i putnike,
- oštećenja konstrukcije i uređaja izazvana zamom materijala, i
- nepravilnosti u radu i poskupljenje održavanja strojnih dijelova i opreme.

U takvim slučajevima je često potrebno uložiti dosta vremena i novaca ublažavanje nepovoljnih vibracijskih efekata [1].

1.1. Vrste vibracija brodske konstrukcije

S obzirom na uzrok vibriranja razlikujemo slobodne i prisilne vibracije. Slobodne vibracije se odvijaju pod djelovanjem vanjskih periodičkih sila, koje deformiraju strukturu u ritmu narinute frekvencijske uzbude. Amplitude prisilnih vibracija ovise o:

- veličini uzbudne sile,
- njenoj frekvenciji,
- mjestu djelovanja.

Prema načinu vibriranja broskog trupa razlikujemo uzdužne, vertikalne, horizontalne i torzijske vibracije, ovisno o tome jesu li pomaci poprečnih presjeka uzdužni, vertikalni ili horizontalni, ili se radi o njihovom zakretanju oko centra torzije [2]. U naravi navedene vrste vibracija ne nastupaju samostalno, već su međusobno spregnute, obično uzdužne s vertikalnim, a horizontalne s torzijskim, pa govorimo o spregnutim vibracijama. Horizontalne i vertikalne vibracije spadaju u poprečne vibracije broskog trupa.

Vibracije trupa možemo podijeliti i na globale i lokalne, ovisno o tome da li djeluju na trup kao cjelinu odnosno pojedine lokalne dijelove strukture, kao što su npr. vibracije dvodna, krmenog dijela broda, nadgrađa itd. One se obično superponiraju na opće vibracije.

Tri važna čimbenika kod razmatranja vibracija su:

- uzbudne sile,
- odziv strukture,
- kriterij prihvatljivosti.

1.2. Izvori vibracija, uzbuda

Glavni izvori uzбудnih sila su sporohodni diesel motor i brodski vijak. Radom brodskih strojeva stvaraju se periodičke sile, koje se preko temelja strojeva prenose na konstrukciju broda. Dva su osnovna načina prijenosa uzbude vijka na konstrukciju broda. Jedan je način putem osovine vijka i osovinskog voda na koji djeluju tzv. **sile uzbude na osovini vijka**, a drugi je način putem krmenog dijela oplata broda na koju djeluje polje dinamičkih tlakova odnosno **površinska sila tlakova** kao njihova rezultanta [3].

Brodski vijak predstavlja glavni pobuđivač vibracija, a za sve vrste i osnovne oblike vibracija nalazi se na najnepovoljnijem mjestu. U ovom se radu upravo sila od propelera na oplatu trupa broda uzima kao pobuda za proračun prisilnih vibracija.

1.3. Odziv konstrukcije

Kako bi se izbjegli nepovoljni vibracijski efekti tijekom projektiranja se provode analize vibracija broskog trupa, na globalnoj i/ili lokalnoj razini, pomoću kojih dobijemo uvid u „ponašanje“ konstrukcije, tj. odziv. Osjetljivost na vibracije može biti provjerena u ranom stupnju projektiranja na osnovu jednostavnih i brzih empirijskih metoda utemeljenih uglavnom na iskustvu [1].

Numeričke metode koje se koriste u proračunu vibracija su:

- Metoda minimuma totalne energije,
- Egzaktno rješenje diferencijalne jednačine,
- Metoda konačnih razlika,
- Metoda konačnih elemenata (MKE)

U ovom se radu koristi MKE kao najvažnija numerička metoda za analizu vibracija

U analizi vibracija se mogu koristiti 1D, 2D ili 3D modeli. Obično se u prvim fazama projektiranja koriste jednostavniji modeli koji brzo daju rezultate, dok se složeni, 3D modeli koriste u kasnim fazama, kada se analiza provodi i za lokalne dijelove konstrukcije. Pri modeliranju brodske konstrukcije koriste se četiri neizostavna i važna parametra:

- krutost brodske konstrukcije,
- efektivna masa,
- prigušenje,
- uzbuda.

1.3.1. Krutost brodske konstrukcije

Modeliranjem brodske konstrukcije i geometrijskih i fizikalnih značajki konačnim elementima, definirana je ujedno i krutost konstrukcije u metodi konačnih elemenata preko matrice krutosti sistema [4].

1.3.2. Efektivna masa

U analizi vibracija efektivna masa se sastoji od mase broda i dodatne mase okolne tekućine. Sama masa broda se sastoji od lake težine (težina čelika, opreme i zaliha) i tereta. Određivanje efektivne mase tereta ovisno o vrsti tereta, tj. da li je tekući, rasuti ili kruti. Tekući teret treba promatrati kao pridruženu masu okolne tekućine, uz određene rubne uvjete [5]. Inženjerski gledano, vibracije broda uzrokuju gibanje okolne tekućine stvarajući dinamički pritisak, koji možemo podijeliti na dvije komponente. Jedna je u fazi s brzinom, predstavlja gubitak energije i može se uključiti u prigušenje. Druga se može smatrati

induciranom ili virtualnom silom inercije određenog volumena tekućine. Masa ovog volumena tekućine naziva se dodatna masa. Dodatna masa znatno utječe na vibracije broda, pa je poželjno da se što točnije odredi. Ona ovisi o vrsti, frekvenciji i obliku vibriranja. Proračun dodatne mase u ovom radu je izvršen metodom Šimanskog.

1.3.3. Prigušenje

Prigušenje vibracija broskog trupa je toliko malo da se kod proračuna slobodnih vibracija i prisilnih vibracija izvan rezonancije ne uzima u obzir. U analizi prisilnih vibracija u rezonanciji prigušenje se mora uzeti u obzir, jer ono sprečava pojavu beskonačno velikih amplituda vibriranja.

Ukupno prigušenje povezano s ukupnim vibracijama brodske konstrukcije trupa općenito se smatra kombinacijom sljedećih komponenti:

- prigušenja strukture,
- prigušenja tereta,
- trenja vode,
- tlakovi uslijed valova,
- generiranja površinskih valova [6].

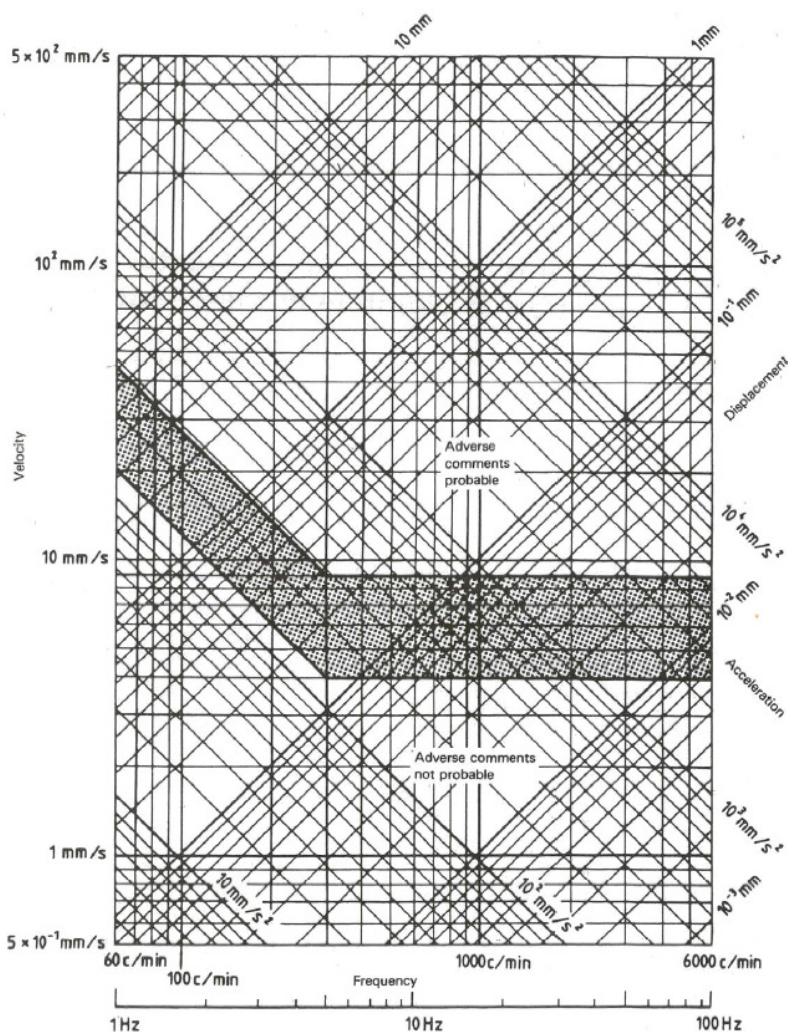
1.4. Kriteriji prihvatljivost

Problemi s vibracijama broskog trupa sve se češće javljaju uslijed sljedećih trendova u projektiranju:

- Optimiziranje težine konstrukcije i, prema tome, niske vrijednosti krutosti i mase,
- prostori rada i boravka u blizini propelera i glavnog motora zbog optimizacije teretnog prostora ili zbog postizanja što većih palubnih otvora za kontejnerske brodove,
- velike snage pogonskih motora za postizanje velikih brzina u službi,
- mali razmaci oko propelera radi veće efikasnosti povećanjem promjera propelera,
- upotreba efikasnih sporohodnih dizel motora.

S druge strane, dosljedna primjena pravila radnih zakona i zahtjevi za boljim životnim uvjetima ističu potrebu za smanjenom razinom vibracija [7].

Kriterij koji se koristi u ovom radu, a i najčešće u praksi je ISO 6954 (1984). Na međunarodnoj razini, standard ISO 6954 (izdanje 1984) je opće prihvaćen za procjenu izloženosti ljudi vibracijama. ISO 6954 (1984) se često koristi kao kriterij prihvatljive pogodnosti za stanovanje i udobnosti posade. Kriteriji su dizajnirani kako bi osigurali razinu vibracija nižom do one na kojoj posada i putnici neće osjećati neugodnosti [6].



Slika 1. ISO 6954 (1984)

1.5. Štetna djelovanja vibracija

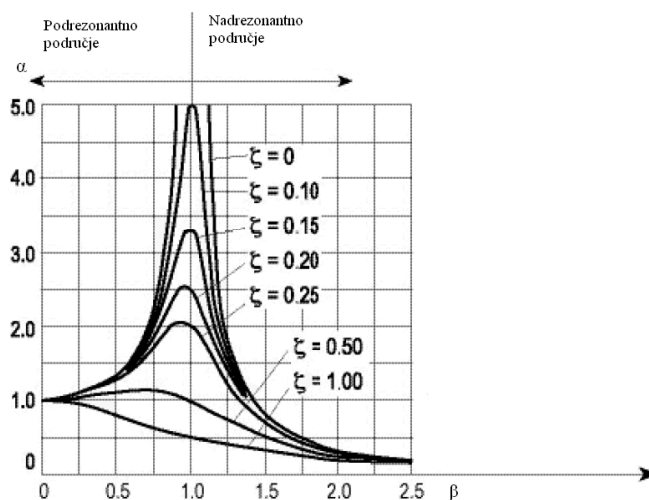
Vibracije su jedan od faktora koji mogu ugroziti sigurnost ljudi i tereta na brodu. One pospješuju zamor materijala brodske konstrukcije i opreme, te pojavu korozije zbog otpadanja boje s metalnih dijelova trupa, što ima za posljedicu skraćeni vijek trajanja broda [2]. Vibracije djeluju nepovoljno psihološki i fiziološki na ljudski organizam smanjujući tako efikasnost rada posade, i udobnost boravka na brodu posadi i putnicima.

1.6. Sprečavanje vibracija

Kako su vibracije brodske konstrukcije neizbježne, one se mogu samo smanjiti, ali ne i potpuno ukloniti. Vibracije se mogu reducirati na više načina:

- smanjenjem uzbudnih sila,
- promjenom njihovih mjesta djelovanja,
- promjenom uzbudnih frekvencija i
- promjenom krutosti sustava.

Mjere smanjenja vibracija su uglavnom usmjerene na izbjegavanje nepovoljnih slučajeva rezonancije (Slika 2.).



Slika 2. Faktor dinamičnosti $\alpha(\beta)$

Uzbudne sile propelera se smanjuju povoljnijim oblikovanjem krme, koja mora omogućiti slobodan dotok vode propeleru i homogenu raspodjelu sustrujanja.

Lokalne vibracije se smanjuju povećanjem krutosti vibrirajućih elemenata, što se postiže ugradnjom koljena i ukrepa.

1.7. Konstrukcijske značajke suvremenih kontejnerskih brodova i posljedice tih značajki na njihovo vibracijsko ponašanje

Kontejnerski brod je, isto kao i sam kontejner, vrlo jednostavne strukture. Nema međupalublja, nema posebnih otvora na palubi ni dizalica, osim u izuzetnim slučajevima, a nema ni druge opreme za prekrcaj jer se uređaji za ukrcavanje i iskrcavanje nalaze na lučkim obalama [4]. Zbog širokih palubnih otvora, centar smika se nalazi izvan poprečnog presjeka, te se javljaju veliki momenti torzije, a i krutost takvih otvorenih presjeka na uvijanje je mala. Suvremeni brodovi za prijevoz kontejnera postaju sve većih dimenzija kako bi mogli prevoziti što više tereta, pa zbog toga i snage koje se ugrađuju postaju iznimno velike. Optimiziranje konstrukcije dovodi do smanjenja mase i krutosti, zbog toga frekvencije slobodnih vibracija postaju sve niže, tako da rezonancija nastupa kod osnovnih oblika vibriranja. Za kontejnerske brodove je još značajno da su im nadgrađa visoka i uska, zbog optimizacije teretnog prostora. Takva nadgrađa su posebno „osjetljiva“ na vibracije uzrokovane radom propelera, zbog čega postoji tendencija kod suvremenih kontejnerskih brodova odmicanja nadgrađa od krme.



Slika 3. Prikaz kontejnerskog 9200 TEU broda Rigoletto

2. IZRADA MODELA

Konstrukcija trupa modelirana je pomoću dvodimenzionalnog modela za proračun vertikalnih vibracija. Model sadrži 202 čvora s ukupno 606 stupnjeva slobode, a sastoji se od 161 membranskih i 346 štapnih elemenata. Model se promatra u vlastitoj ravnini tako da svi čvorovi imaju po tri stupnja slobode gibanja, tj. uzdužni i vertikalni pomak i zakret oko osi z. Štapni elementi se pružaju na mjestu dna A_1 , pokrova dvodna A_2 , neutralne osi A_3 , palube A_4 i na vrhu pražnice na mjestu flanže A_5 , a između njih se nalaze membranski elementi. Između dna i pokrova dna je membrana debljine t_6 . Na mjestu struka pražnice se nalazi membrana debljine t_7 , i između pokrova dna i neutralne linije je membrana debljine t_8 , te između neutralne linije i palube membrana debljine t_8 .

2.1. Osnovne značajke broda

Type of Vessel:	Container vessel
Year built:	2006
Gross-Tonnage:	107711
Tons Deadweight:	114004 t
Container:	9200 TEU
Length:	349.00 m
Breadth:	42.80 m
Draft:	15.00 m
Power:	69504 KW
Speed:	25.7 kN

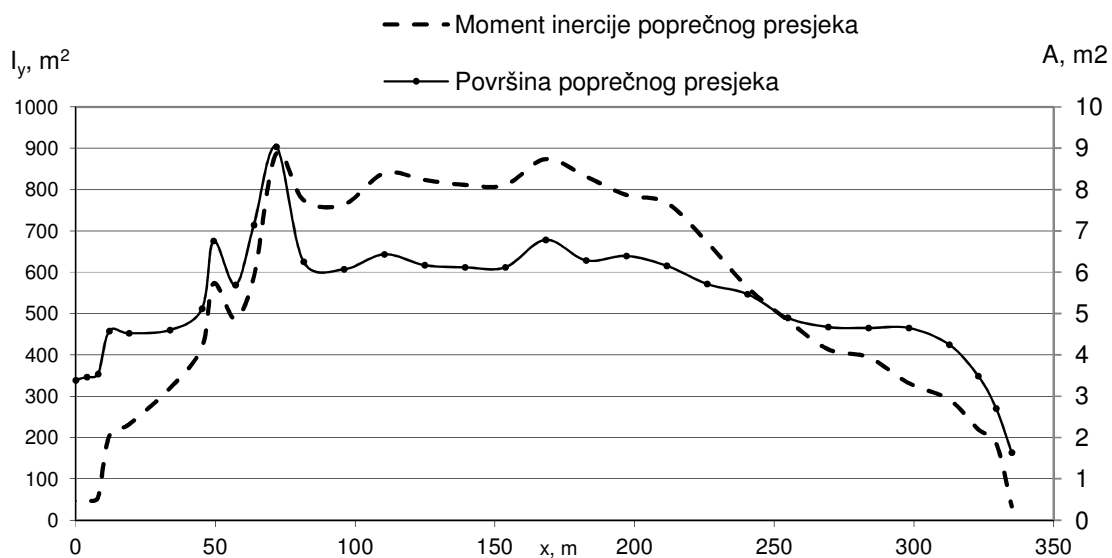
2.2. Ulazni parametri

Karakteristike poprečnog presjeka uzimamo iz programa DYANA. Karakteristike koje su potrebene su:

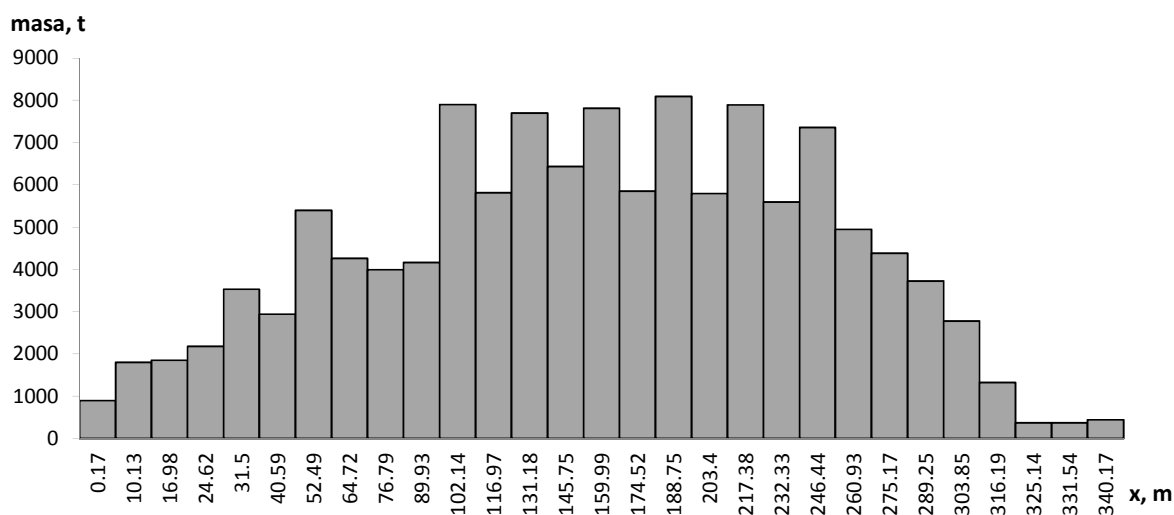
- A – površina poprečnog presjeka u m^2
- A_s – smična površina poprečnog presjeka u m^2
- I_y – moment inercije poprečnog presjeka u m^4
- masa broda po jedinici dužine trupa u t/m
- dodatna masa po jedinici dužine trupa u t/m

Nadalje iz nacрта se očitavaju vrijednosti:

- za pražnicu: debljina lima struka $\rightarrow t_7$
površina flanže za poprečni presjek $\rightarrow A_5$
- zbroj debljina bočnih nosača u dvodnu $\rightarrow t_6$
- površine limova: dna $\rightarrow A_1$
dvodna za poprečni presjek $\rightarrow A_2$



Dijagram 1. Moment inercije i površina poprečnog presjeka po duljini broda



Dijagram 2. Raspodjela masa po duljini broda

Geometrijske značajke konačnih elemenata trupa određene su tako da zadovoljavaju značajke poprečnog presjeka trupa. Model trupa je sačinjen od pet štapnih elemenata koji se protežu u visini dna i dvodna, neutralne linije, palube i flanže pražnice, te četiri membranska elementa koji se nalaze između njih. Nadgrađe, krma i pramac su modelirani tako da geometrijski budu što sličniji brodu. Debljina membrana iznosi:

t_7 – debljina membrane na mjestu struka pražnice

t_6 – debljina membrane između dna i pokrova dvodna

$$t_8 = t_9 = \frac{A_{S0}}{25,3} \quad (1)$$

gdje je:

A_{S0} – smična površina

t_9 – debljina membrane između visine pokrova dvodna i neutralne linije

t_8 – debljina membrane između neutralne linije i palube

$$25,3 = H - h_{db} \quad (2)$$

$H = 27,3$ m – visina broda

$h_{db} = 2$ m – visina dvodna

$$A_{S0} = A_S - (t_6 * h_{db} + t_7 * h) \quad (3)$$

A_S – sična površina poprečnog presjeka

$h = 1,8$ m – visina pražnice

Nakon čega su poznata svojstva svih elemana osim A_3 i A_4 koji se određuju prema slijedećim izrazima:

$$A_3 = A - A_1 - A_2 - A_4 - A_5 - A_S \quad (4)$$

gdje je:

A_3 – površina štapa na mjestu neutralne osi

A – ukupna površina poprečnog presjeka

A_1 – površina štapa na mjestu dna

A_2 – površina štapa na mjestu dvodna

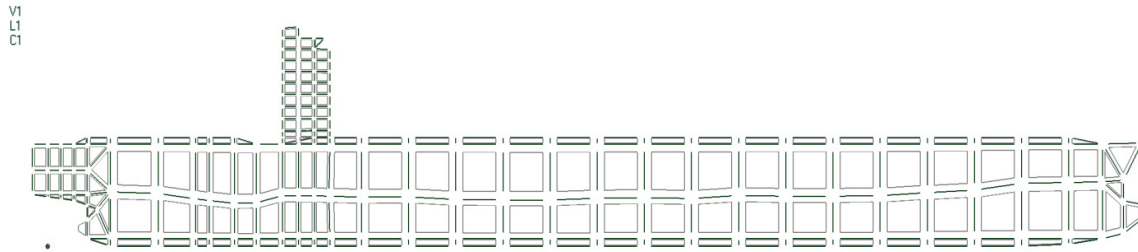
A_4 – površina štapa na mjestu palube

A_5 – površina štapa na mjestu flaže pražnice

$$\begin{aligned} I_y = & A_1 * y_{NL}^2 + A_2 * (y_{NL} - h_{db})^2 + A_4 * (H - y_{NL})^2 + A_5 * (H + h_{pražnica} - y_{NL})^2 \\ & + \frac{t_6 * h_{db}^3}{12} + t_6 * \left(y_{NL} - \frac{h_{db}}{2}\right)^2 + \frac{t_9 * (y_{NL} - h_{db})^3}{12} + t_9 * \left(\frac{y_{NL} - h_{db}}{2}\right)^2 \\ & + \frac{t_8 * (H - y_{NL})^3}{12} + t_8 * \left(\frac{H - y_{NL}}{2}\right)^2 + \frac{t_7 * (h_{pražnica})^3}{12} \\ & + t_8 * (H + h_{pražnica}/2)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Iz (5) se dobije A_4 nakon čega se uvrštavanjem u (4) dobije A_3 .

Krma, pramac i nadgrađe nisu modelirano na ovaj način, već su površine štapnih elemenata i debljina membrana odabrani prema nacrtima.



Slika 4. 2D model konačnih elemenata

2.3. Određivanje dodane mase

Prema Šimanskom, dodatna masa po jedinici dužine trupa određuje se prema izrazu:

$$m_{vx} = \frac{\pi}{2} * \rho * b^2 * c_v * K \quad (6)$$

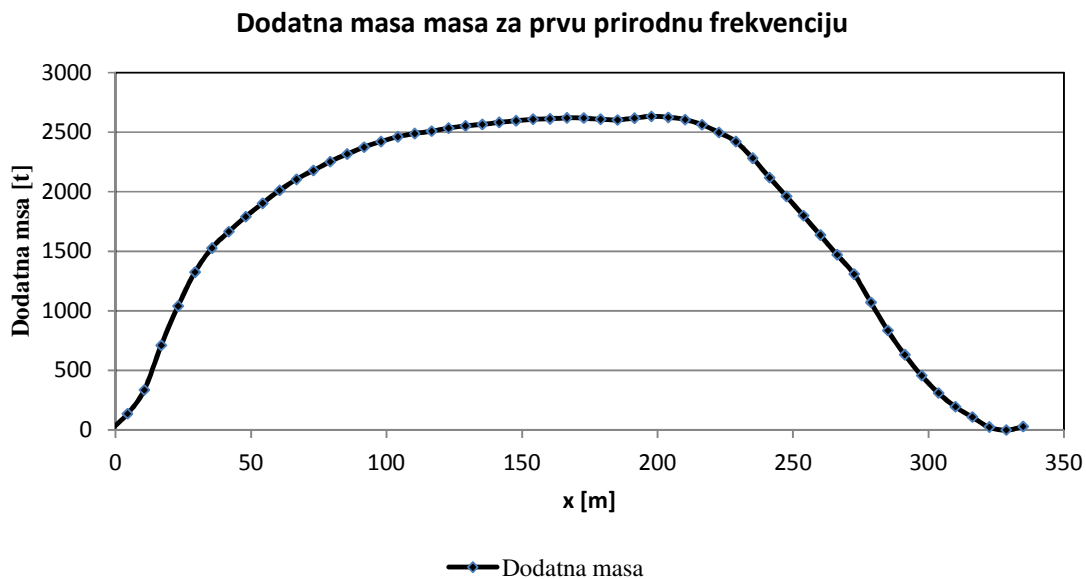
U ovom izrazu je:

ρ – gustoća vode

b – polovina ordinate plovne vodne linije na promatranom rebru

c_v – koeficijenti dvodimenzionalnog strujanja za vertikalne vibracije

K – korekcijski koeficijent trodimenzionalnog strujanja



Dijagram 3. Distribucija dodatne mase za prvu prirodnu frekvenciju

Tablica 1. Iznos dodatne mase za prvu prirodnu frekvenciju

Dodatna masa	
Masa	Težina
[t]	[kN]
192806,8	1891435

2.4. Određivanje uzbudne sile

Za prisilne vibracije moramo odrediti uzbuđu, u ovom slučaju za uzbuđu uzimamo periodičku silu koju uzrokuje rad propelera na oplatu broskog trupa prema [1].

Tlak na oplatu trupa iznad broskog vijka računamo prema jednadžbi:

$$P_{max} = 0,844 \frac{\nabla}{D^2} \sqrt{\left(\frac{1,4 \cdot 10^6 \cdot BH}{\nabla \cdot L \cdot f} - f\right)^2 + 7} \quad (7)$$

gdje je:

∇ - istisnina

B – širina vodne linije

D – promjer propelera

H – visina

L – duljina između perpendikulara

f – frekvencija krila propelera

$$\Delta P_{max} \leq 8500 \text{ N/m}^2$$

Izračunata vrijednost: $P_{max} = 3455 \text{ N/m}^2$

Uzбудnu silu računamo prema izrazu:

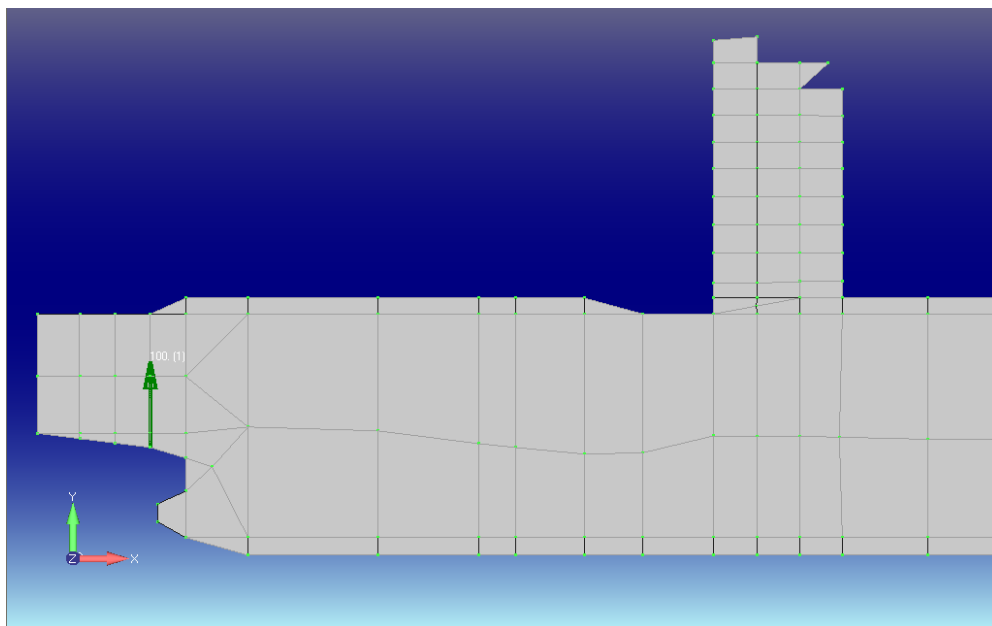
$$F = P_{max} * S \text{ kN} \quad (8)$$

S – površina oplata na koju djeluje tlak u m^2

$$S = 28,94 \text{ m}^2$$

Za uzбудnu silu se dobije: $F = 100 \text{ kN}$

Analizom se dobivaju komponente brzina u smjeru osi x i y koje se uspoređuju s kriterijima podobnosti. Raspon frekvencija koje se promatraju je od 5 Hz do 9 Hz jer je u tom području uzbuđena krila propelera, tj. frekvencija periodičke sile koju uzrokuje propeler.



Slika 5. Uzbudna sila

3. REZULTATI ANALIZE

Analiza je provedena u programu NX Nastran. Nastran koristi konačne elemente za rješavanje analiza oprerećenja, vibracija, strukturnih pukotina, prijenosa topline i akustičnosti. Brojne industrije koriste NX Nastran za rješavanje kritičnih tehničkih problema, kako bi proizvodili sigurne, pouzdane i optimirane proizvode u kraćem vremenu projektiranja.

3.1. Rezultati slobodnih vibracija

Rezultati slobodnih vibracija bez dodatne mase dani su u Tablici 2 i 3, a rezultati slobodnih vibracija sa dodatnom masom u Tablici 4.

Tablica 2. Usporedba „suhih“ prirodnih frekvencija 2D i 3D modela, f_i [Hz]

Red vibriranja	2D FEM	3D FEM ¹	Razlika, %
1	0,682	0,674	1,19
2	1,328	1,376	-3,49
3	1,930	2,243	-13,95
4	2,640	2,954	-10,63

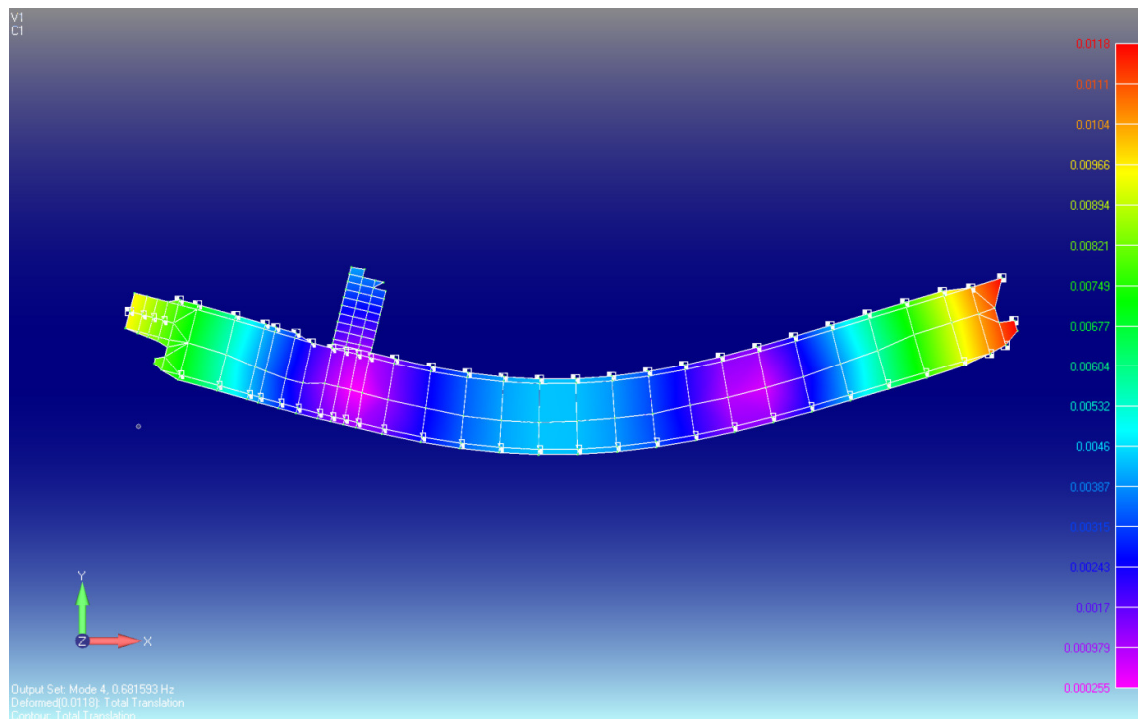
Tablica 3. Usporedba „suhih“ prirodnih frekvencija 2D i 1D modela, f_i [Hz]

Red vibriranja	2D FEM	1D FEM	Razlika, %
1	0,682	0,682	0

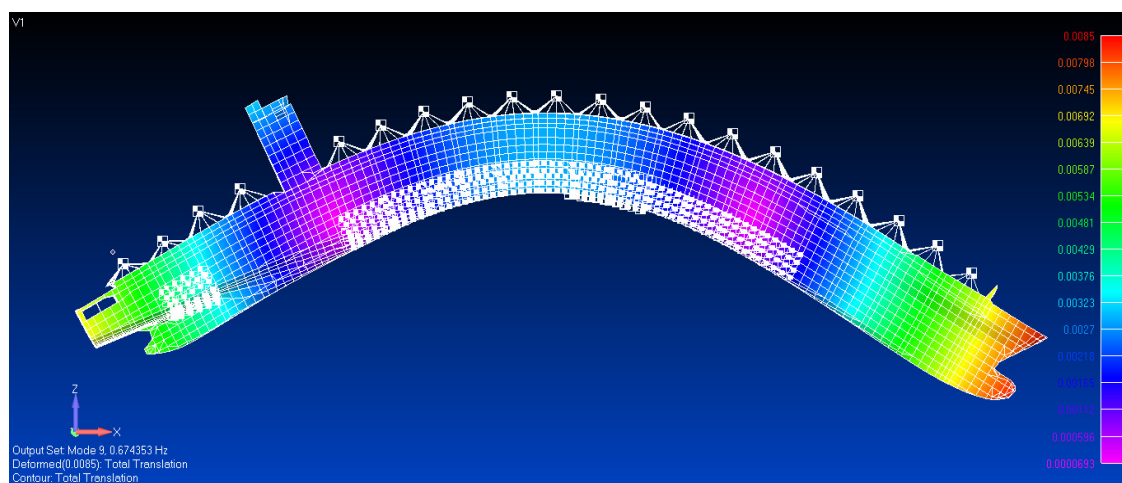
Tablica 4. Usporedba „mokrih“ prirodnih frekvencija 2D i 1D modela, f_i [Hz]

Red vibriranja	2D FEM	1D FEM	Razlika, %
1	0,492	0,519	-5,2
2	0,958	1,102	-13,07
3	1,395	1,729	-19,31
4	1,841	2,367	-22,22

¹ Vrijednosti frekvencija su posuđene iz diplomskog rada Ane Đigaš, Zagreb, 2011.

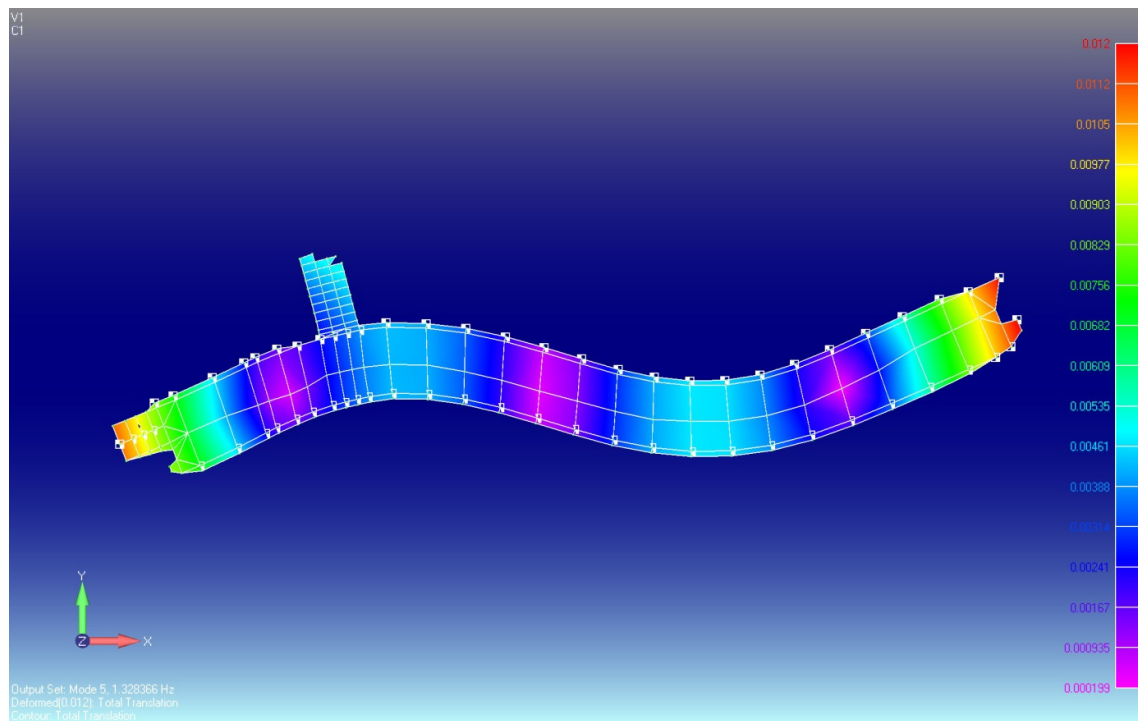


Slika 6. Prvi oblik vibriranja bez dodatne mase 2D modela

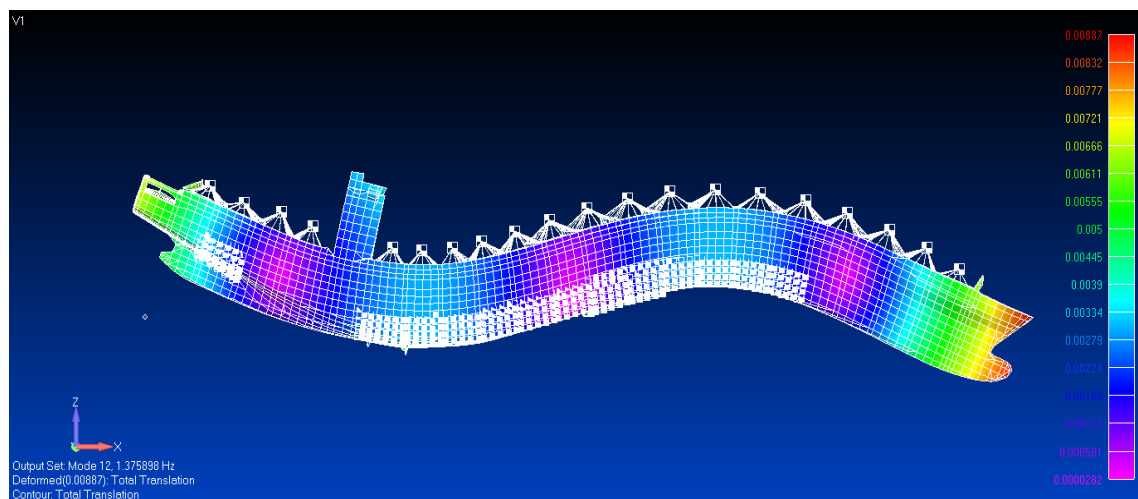


Slika 7. Prvi oblik vibriranja bez dodatne mase 3D modela²

² Slika je posuđena iz diplomskog rada Ane Đigaš, Zagreb, 2011.

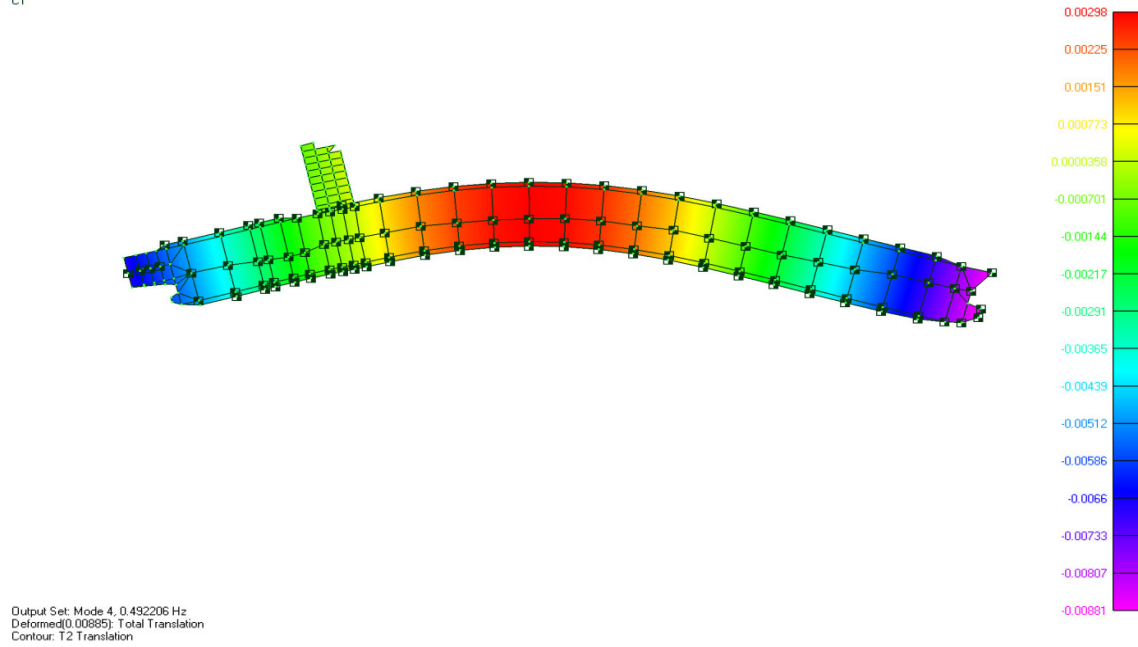


Slika 8. Drugi oblik vibriranja bez dodatne mase

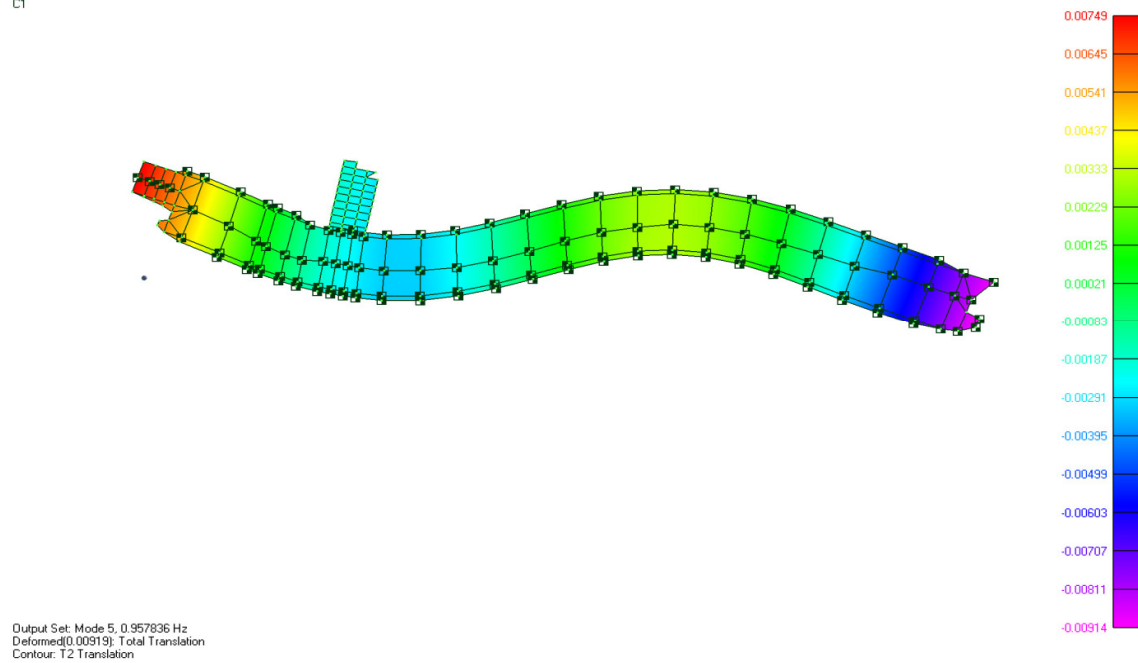


Slika 9. Drugi oblik vibriranja bez dodatne mase³

³ Slika je posuđena iz diplomskog rada Ane Đigaš, Zagreb, 2011.

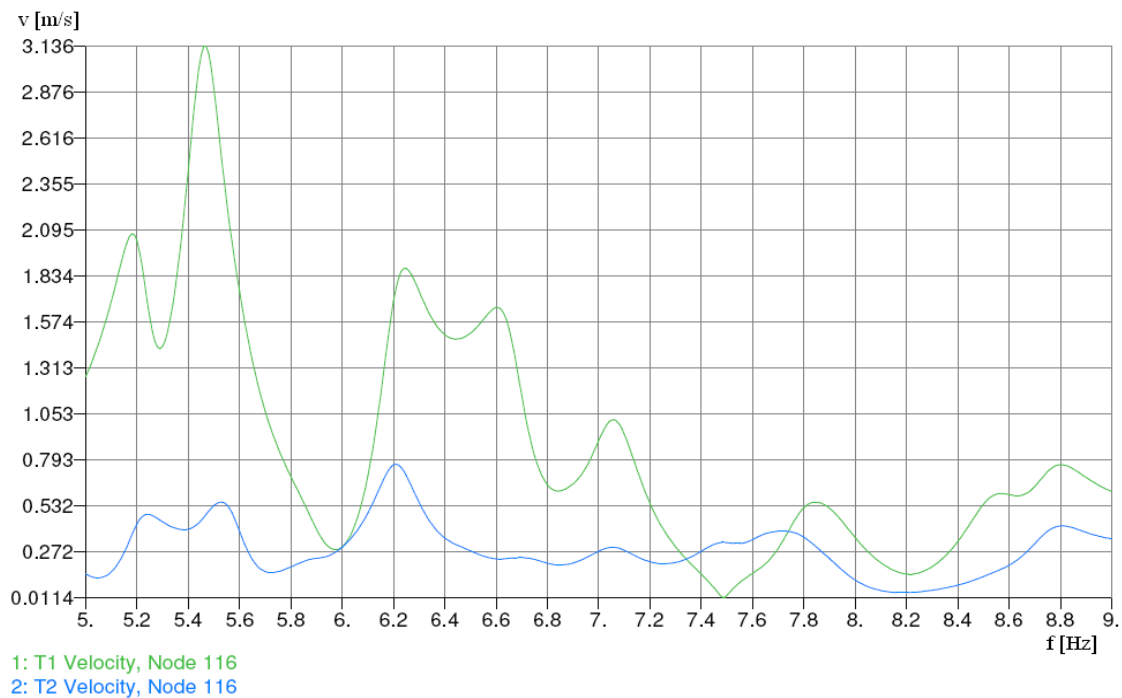
V1
C1

Slika 10. Prvi oblik vibriranja sa dodatnom masom

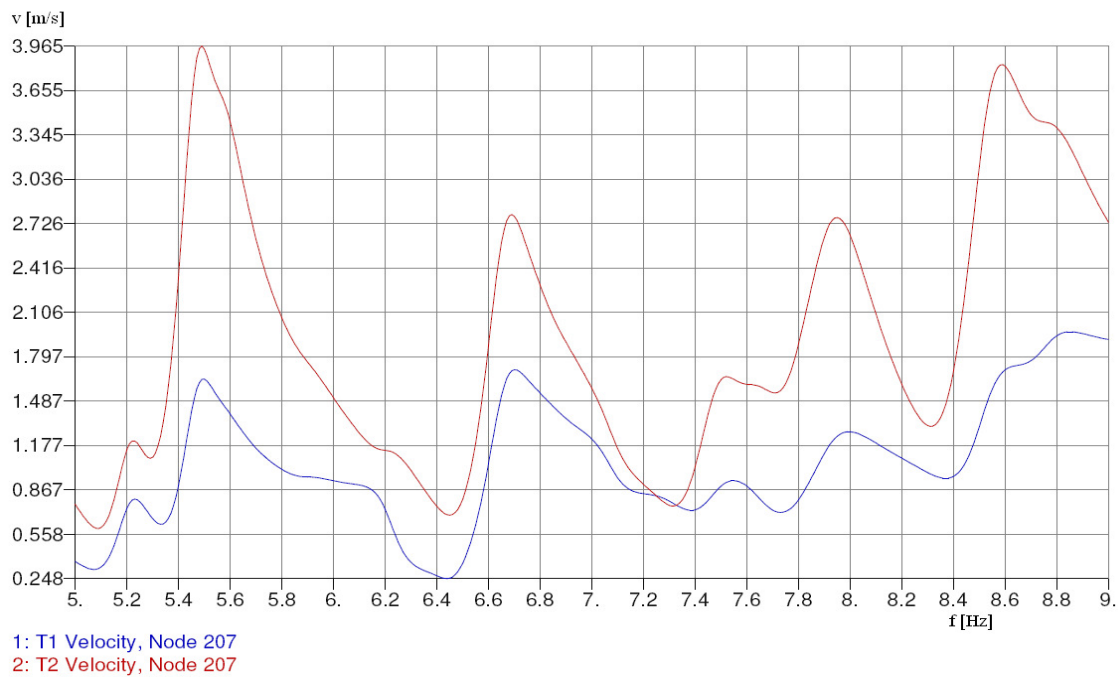
V1
C1

Slika 11. Drugi oblik vibriranja sa dodatnom masom

3.2. Rezultati prisilnih vibracija

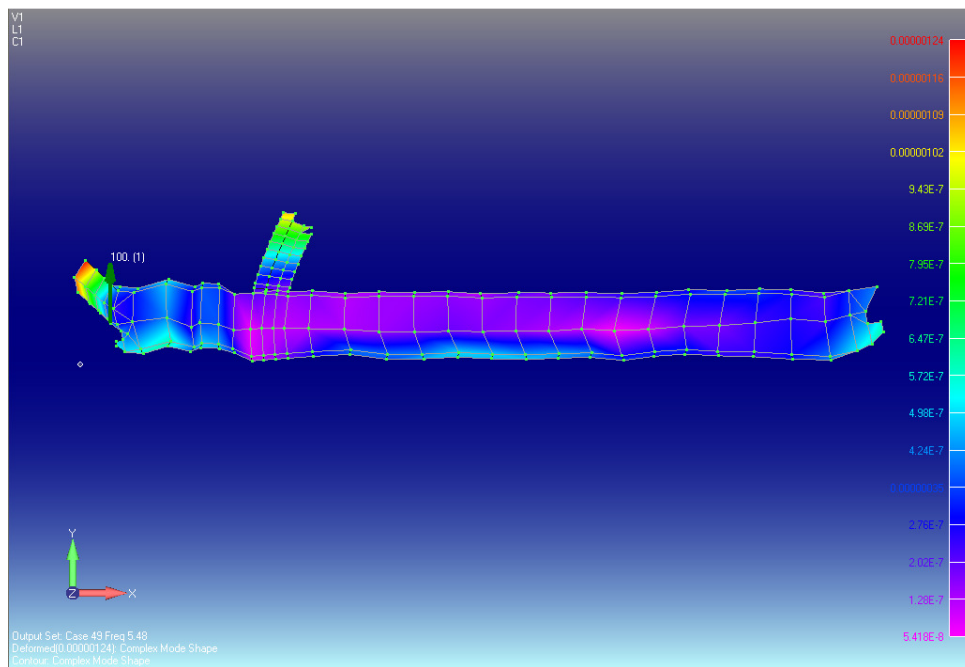


Dijagram 4. Komponente brzina za čvor 116

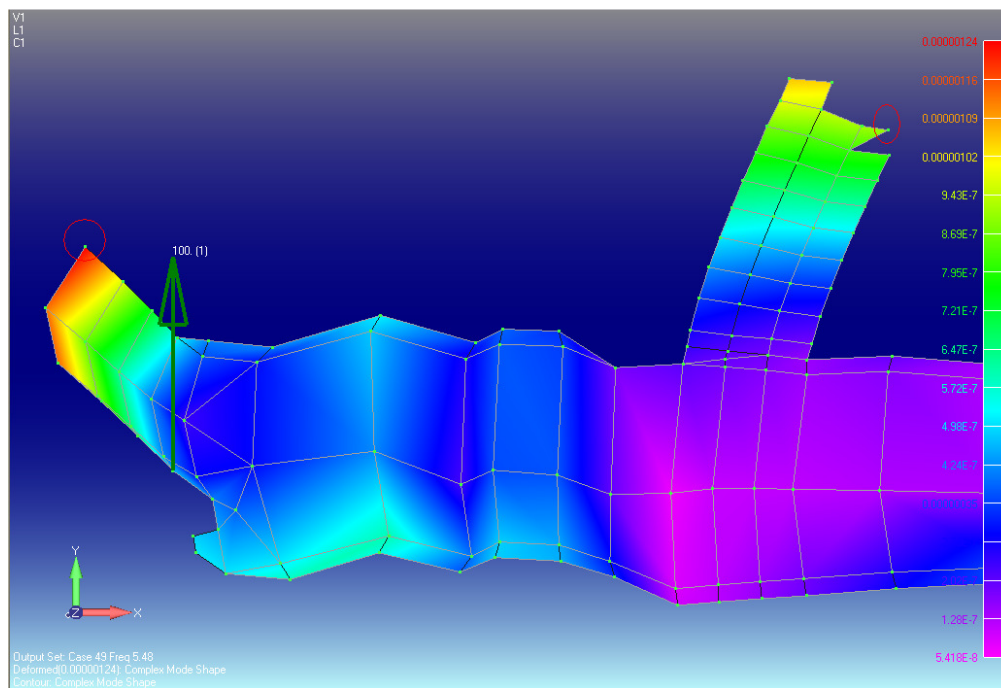


Dijagram 5. Komponente brzina za čvor 207

Dijagrami 4. i 5. pokazuju komponente brzina u čvorovima na vrhu nadgrađa, tj. komandnom mostu (čvor 116) i na krmu na mjestu spoja zrcala i palube (čvor 207). Čvorovi se nalaze na najkritičnijim mjestima s obzirom na globalne vibracije. Iz dijagrama se vidi kako komponente brzine ne prelaze brzinu od 4 m/s što je prema ISO 6954 standardu odziv koji je prihvatljiv.



Slika 12. Oblik vibriranja za $f = 5.48$ Hz



Slika 13. Prikaz kritičnih dijelova brodske konstrukcije za $f = 5.48$ Hz

Slika 11. prikazuje oblik vibriranja prisilnih vibracija za frekvenciju 5.48 Hz koja je očitana iz Dijagrama 4. i 5. kod koje odziv vibriranja daje najveće komponente brzina za kritične čvorove. Vertikalne vibracije u dnu nadgrađa uzrokuju horizontalne vibracije na višim dijelovima nadgrađa što vidi iz Slike 12.

ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza globalnih slobodnih i prisilnih vibracija. Takva je analiza dio standardne brodograđevne prakse radi određivanja dinamičkih odziva i otklanjanja eventualnih nepovoljnih vibracijskih efekata.

Analiza slobodnih vibracija dvodimenzionalnog modela bez dodatne mase pokazuje jako mala odstupanja od 3D modela za prva dva reda vibriranja. Razlike su unutar $\pm 5\%$, što je tehnički prihvatljivo. Vrijednosti prvog reda vibriranja jedno- i dvodimenzionalnog modela je jednaka, te je malo viša od trodimenzionalnog modela. Razlog tome je što je krutost trodimenzionalnog modela manja i bliža realnosti. Kako je za više oblike vibriranja potrebna finija 3D mreža konačnih elemenata, odstupanja 2D modela za više oblike postaju znatno veća.

Odstupanje u odnosu na gredni model od -5.2% za prvi red „mokrih“ vibracija, možemo smatrati prihvatljivim, dok se kod viših oblika vibriranja razlika povećava. Razlog sve većeg odstupanja je u tome što je dodatna masa određena za prvi oblik vibriranja te bi za više oblike vibriranja trebalo uzeti pripadajuće vrijednosti dodatnih masa, što bi znatno usložnilo proračuna.

Proračun za prisilne vibracije pokazuje kako se neće pojaviti negativni vibracijski efekti na kritičnim mjestima (krmenom djelu i komandnom mostu). Posebno je važno da komponente brzina vibracija nadgrađa budu niže od 4 mm/s .

Možemo zaključiti kako dvodimenzionalna analizom relativno brzo dobivamo informacije o osnovnim vibracijskim značajkama konstrukcije uz zadovoljavajuću točnost. Važno je napomenuti da je dvodimenzionalni model znatno jednostavniji za izradu od 3D modela, što može biti iznimno važno u ranoj fazi projektiranja konstrukcije, kada detaljni nacrti još nisu dostupni.

LITERATURA

- [1] Holden, K. D., Fagerjord, O., Frostad, R.: "Early Design Stage Approach to Reducing Hull Surface Forces Due to Propeller Cavitation", SNAME Transactions, Vol. 88, 1980, 319 - 356
- [2] Senjanović, I.: Vibracij broda, II dio, Sveučilište u Zagreb, 1976.
- [3] Grubišić, R.: Dinamička opterećenja i odaziv brodskih konstrukcija, Zagreb, 2007.
- [4] Senjanović, I.: Metoda konačnih elemenata u strukturnoj analizi brodskih konstrukcija, Sveučilište u Zagreb, 1975.
- [5] WIKIPEDIA The Free Encyclopedia
http://hr.wikipedia.org/wiki/Kontejnerski_brod
- [6] American Bureau of Shipping GUIDANCE NOTES ON SHIP VIBRATION, APRIL 2006.
- [7] Iwer Asmussen, Wolfgang Menzel, Holger Mumm, Germanischer Lloyd SHIP VIBRATION, Hamburg, 2001.