

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūrų technikos fakultetas

Laivo inžinerijos katedra

Gediminas Šerlinskis

**PROJEKTUOJAMO LAIVO  
HIDRODINAMINIŲ SAVYBIŲ  
PROGNOZAVIMO  
REGULIARIOSE BANGOSE  
TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos magistro  
baigiamasis darbas

# Klaipėda, 2013

## Turinys

<b>ĮVADAS</b> .....	9
<b>I. TEORINĖ DALIS</b> .....	10
1.1 Problemos analizė .....	10
1.2 Laivo supimosi vertinimas klasikinės teorijos pagrindu .....	17
1.3 Skerspjūvių metodas paremtas greičio potencialo teorija .....	19
1.4 Supimosi skaičiavimai paremti hidrodinamine supimosi teorija .....	24
<b>II. EMPIRINĖ DALIS</b> .....	27
2.1 Laivo supimosi skaičiavimas pagal klasikinę supimosi teoriją .....	27
2.2 Laivo supimosi skaičiavimas „Seakeeper“ kompiuterine programa.....	30
2.3 Laivo supimosi skaičiavimas CFD metodu .....	38
2.4 Eksperimento planas .....	46
2.5 Modelio gamyba ir paruošimas eksperimentui .....	50
2.6 Reikiamos laboratorinės įrangos parinkimas .....	54
2.7 Eksperimentinis tyrimas .....	56
2.8 Eksperimento rezultatų apdorojimas .....	58
<b>III. SKAIČIAVIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ</b> .....	61
<b>IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS</b> .....	63
<b>LITERATŪRA</b> .....	64
<b>PRIEDAI</b> .....	65
1 Priedas. Laivo teorinis brėžinys .....	66
2 Priedas. Tiriamojo laivo duomenys.....	67
3 Priedas. FLOW-3D skaičiavimų rezultatai .....	68

## PAVEIKSLŲ SARASAS

1 pav. Laivo supimosi tipai.....	10
2 pav. Reguliarios bangos.....	11
3 pav. Hidromechaninių ir bangų jėgų superpozicija.....	12
4 pav. Bangų jėgos veikiančios vertikaliai besisupanti cilindrą .....	13
5 pav. Vertikali jėga veikianti cilindrą .....	15
6 pav. Laivo slopstančių svyravimų kreivė .....	16
7 pav. Statinio stovumo pečių diagrama ir pečių kitimas priklausomai nuo kreno .....	17
8 pav. Koordinačių ašys.....	18
9 pav. Lewio sekcijų transformavimo schema.....	23
10 pav. Skaičiavimų masyvas .....	25
11 pav. Bortinio supimosi dažninė charakteristika .....	29
12 pav. Vertikalaus supimosi dažninė charakteristika .....	29
13 pav. Laivo skerspjūvio transformavimas .....	31
14 pav. Svorio centro ir masės inercijos spindulių nustatymas .....	31
15 pav. Laivo svyravimai ramiaame vandenyje .....	32
16 pav. Slopstančių svyravimų kreivė.....	32
17 pav. Bangų kryptys.....	33
18 pav. Hidrodinaminė vandens masė ir papildoma inercija.....	34
19 pav. Dempferavimo koeficientai .....	35
20 pav. Bortinio supimosi dažninė charakteristika .....	35
21 pav. Vertikalaus supimosi dažninė charakteristika .....	36
22 pav. Kilinio supimosi intensyvumo dažninė charakteristika .....	37
23 pav. Vertikalaus supimosi intensyvumo dažninė charakteristika .....	37
24 pav. Skaičiavimų tinklas .....	39

25 pav. Skaičiavimų tinklo parametrai.....	39
26 pav. Tinklelio tankumo įtaka geometrijos kokybei.....	40
27 pav. Skaičiavimo masyvo pradinės sąlygos.....	40
28 pav. Laivo masė ir inercijos momentai.....	41
29 pav. a) Kampinio greičio (rad/s) priklausomybė nuo laiko (s), b) Diferanto kampo (rad) priklausomybė nuo laiko (s).....	42
30 pav. a) bortinio supimosi kampinis greitis (rad/s) priklausomai nuo laiko, b) Kreno kampas (rad) priklausomai nuo laiko (s).....	43
31 pav. Skaičiavimų tinklų parametrai.....	43
32 pav. Pakoreguotas skaičiavimų tinklas.....	44
33 pav. a) Vertikalus poslinkis (m) priklausomai nuo laiko (s), b) vertikalaus supimosi greitis (m/s) priklausomai nuo laiko (s).....	44
34 pav. a) Kilinio supimosi diferento kampas (rad) priklausomai nuo laiko (s), b) Kilinio supimosi kampinis greitis priklausomai nuo laiko (s).....	45
35 pav. Maksimalus bangų dažnis kuriam esant psireiškia bangų interferencija.....	47
36 pav. Automatizuotas modelio išpjovimas.....	51
37 pav. Modeliai ir ant jų paviršiaus žymimos linijos - atitinkančios španhautus ir vaterlinijas.....	51
38 pav. Krenavimo bandymas panaudojant: a) svambalą, b) inklinometrą.....	53
39 pav. Laivo modelio svorio centro abscisės nustatymas.....	54
40 pav. Bandymo baseinas.....	54
41 pav. a) bangų sugėrimo paplūdimys, b) bangų generatorius.....	55
42 pav. bangografi ir jų išdėstymas.....	55
43 pav. Laivo supimosi matavimas.....	56
44 pav. Ekperimento duomenų analizė.....	59
45 pav. Eksperimento rezultatų apdorojimas.....	59
46 pav. Vandens lygio kitimas (m) priklausomai nuo bangų padėties išilgai laivo.....	68
47 pav. Slėgio kitimas priklausomai nuo bangų padėties išilgai laivo.....	68
48 pav. Vandens dalelių greitis (m/s).....	68
49 pav. Vandens dalelių greitis (m/s) x ašies kryptimi.....	69

50 pav. Vandens dalelių greitis (m/s) z ašies kryptimi.....	69
---	----

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

1 lentelė. Nustatyti bangų parametrai.....	27
2 lentelė. Bortinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai .....	27
3 lentelė. Bortinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai .....	28
4 lentelė. Reguliarių bangų parametrai.....	33
5 lentelė. Reguliarių bangų parametrai.....	33
6 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, bangų kryptis 90 laipsnių .....	34
7 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, bangų kryptis 90 laipsnių .....	34
8 lentelė. Supimosi skaičiavimų rezultatai - bangų kryptis 180 laipsnių .....	36
9 lentelė. Supimosi skaičiavimų rezultatai - bangų kryptis 180 laipsnių .....	37
10 lentelė. Modelio fizikinių dydžių santykiai su realiu laivu.....	52
11 lentelė. Bangavimo parametrai.....	57
12 lentelė. Bangavimo parametrai.....	57
13 lentelė. Bangavimo parametrai.....	58
14 lentelė. Bangavimo parametrai.....	58
15 lentelė. Eksperimento rezultatai (90 laipsnių bangavimas) .....	59
16 lentelė. Eksperimento rezultatai (90 laipsnių bangavimas) .....	60
17 lentelė. Eksperimento rezultatai (180 laipsnių bangavimas) .....	60
18 lentelė. Eksperimento rezultatai (180 laipsnių bangavimas) .....	60
19 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 90 laipsnių bangų krypčiai .....	61
20 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 90 laipsnių bangų krypčiai .....	61
21 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 180 laipsnių bangų krypčiai .....	61
22 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 180 laipsnių bangų krypčiai .....	62
23 lentelė. Laivo pagrindiniai duomenys .....	67
24 lentelė. Modelio ir prototipo duomenys.....	67

## SANTRAUKA

Šerlinskis G .Projektuojamo laivo hidrodinaminių savybių reguliariose bangose tyrimas. Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas doc. dr. J. Čerka, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2013. – 69 p.

Darbe tiriamos galimybės vertinti laivo supimosi intensyvumą taikant klasikinės ir hidrodinaminės laivo supimosi skaičiavimo metodikas. Prognozavimo galimybių įvertinimui atliekamas laivo DTMB 5415 supimosi eksperimentas reguliariose bangose – matuojamas laivo bortinis, kilinis ir vertikalusis supimasis laivui stovint lagu bangoms ir esant išilginiam bangavimui. Pateikiama informacija apie supimosi eksperimento eigą, paruošimą, naudojamą laboratorinę įrangą ir bandymo rezultatų apdorojimą. Laivo supimosi skaičiavimai atliekami taikant hidrodinaminę skaičiuojamosios skysčių dinamikos kompiuterinę programą „FLOW-3D“, klasikinę supimosi skaičiavimų metodiką ir kompiuterine programa „Seakeeper“ paremta hidrodinamine plokščiųjų skerspjuvių teorija. Gauti rezultatai palyginami su eksperimento rezultatais.

**Raktiniai žodžiai:** bortinis supimasis, kilinis supimasis, vertikalusis supimasis, supimosi eksperimentas, plokščiųjų skerspjuvių teorija, klasikinė supimosi teorija, skaičiujami skysčių dinamika.

## SUMMARY

Šerlinskis G. Preliminary analysis of ship hydrodynamics in regular waves. Naval architecture course final paper. Work leader doc. dr. J. Čerka Klaipėda University: Klaipėda, 2013. – 69 p.

Paper analysis the most popular classical and hydrodynamical seakeeping methods for preliminary seakeeping performance prediction. Seakeeping test in regular waves has been performed for validation of seakeeping prediction methods for model DTMB 5415. Roll, pitch and heave motions have been measured for beam and head seas wave headings. The paper supplies information about seakeeping test process, preparation instructions for test, required laboratory equipment and seakeeping test data analysis.

Computational fluid dynamics software „FLOW - 3D“ have been used for motion response prediction in regular waves, classical seakeeping theory method and strip theory based software Seakeeper. Computed results have been compared with seakeeping experimental data.

**Keywords:** Roll motion, pitch, heave, seakeeping experiment, strip theory, classical seakeeping theory, computational fluid dynamics.

## ĮVADAS

Daugelis laivų yra projektuojami galinčiais dirbti sudėtingomis hidrometeorologinėmis sąlygomis esant intensyviai bangavimui ir vėjui. Geros supimosi charakteristikos turi būti užtikrinamos žvejybiniam, kruiziniam, gelbėjimo laivams, taip pat laivams, kurie turi praleisti nemažai laiko jūroje atlikdami specialias operacijas (naftos gavyba, tyrimai ir kt). Projektuojant laivo korpusą optimalų supimosi atžvilgiu dažniausia neužtenka pakeisti dalį korpuso formos, nes supimasis priklauso nuo visos korpuso formos tipo ir dydžio.

Laivo supimosi skaičiavimų tikslas – prognozuoti laivo hidrodinamines savybes esant vandens bangavimui. Analizuojant laivo hidrodinamines savybes svarbu nustatyti bangavimo režimus, kuriuose laivas galėtų būti saugiai eksploatuojamas. Šiuo metu laivo supimosi skaičiavimai atliekami kompiuterinėmis programomis, kurios leidžia projektuotojui prognozuoti ir įvertinti laivo supimosi intensyvumą neatliekant eksperimento. Atlikus supimosi skaičiavimus nedideliems projektams supimosi skaičiavimai buvo įtraukti į daugelio laivų projektavimo etapus. Šių skaičiavimų būtinybę lėmė iškelti supimosi intensyvumo reikalavimai keleivių patogumo užtikrinimui ir galimybės gabenti kuo daugiau krovinių. Tokie skaičiavimai tapo svarbūs ne tik saugumo užtikrinimui, bet ir verslui įskaitant laivų savininkų susirūpinimą savo laivų hidrodinaminių savybių galimybėmis.

Pagrindiniai supimosi tipai yra šie: bortinis, kilinis ir vertikalusis supimasis. Svarbiausias supimosi tipas laivo stabilumo atžvilgiu yra bortinis supimasis, todėl svarbu pakankamai tiksliai prognozuoti supimosi charakteristikas pradiniam projektavime. Metodų, leidžiančių apskaičiuoti laivo supimąsi yra taikoma įvairių, tačiau ne visada yra pasiekiami gerų rezultatų. Patikimi rezultatai gaunami atlikus modelio supimosi eksperimentą, tačiau šie eksperimentai yra pakankamai brangūs ir sudėtingi, bet projektuotojai laivo korpuso optimizavimą atlieka ne tik pagal skaičiavimus, bet ir pagal eksperimentų duomenis.

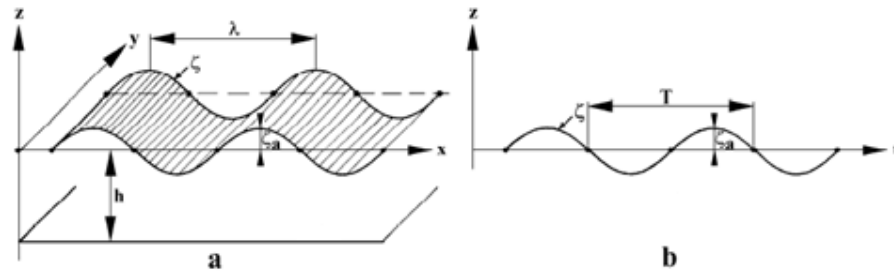
**Darbo tikslas** – Projektuojamo laivo hidrodinaminių savybių preliminaraus vertinimo metodikos sudarymas.

### **Darbo uždaviniai:**

1. Išanalizuoti laivo supimosi esant reguliariam bangavimui išankstinio vertinimo galimybes;
2. Atlikti nagrinėjamo laivo eksperimentinius tyrimus;
3. Sudaryti laivo supimosi matematinį modelį;
4. Pateikti rekomendacijas praktiniam preliminariam projektuojamo laivo supimosi intensyvumo vertinimui.



– jos suyra. Bangos statumo santykinio dydžio ribinė reikšmė yra apie 1/7 (Journée, et al., 2002, 8 p.).



2 pav. Reguliarios bangos

Jėgos, priverčiančios laivą suptis vadinamos bangų ir jų difrakcijos hidrodinaminėmis jėgomis ir momentais. Bangos profiliui praeinant pro vandenyje plūduriuojanti laivą pasikeičia povandeninės dalies paviršiaus plotas, pasikeitus povandeninės dalies plotui keičiasi laivo plūdrumo jėgos dydis ir jos veikimo centras, todėl laivas pradeda svyruoti.

Pačios bangų difrakcinės jėgos susidaro bangoms apeinant aplink laivą. Bangos profiliui pereinant per korpuso buvimo vietą dalis bangos energijos sunaudojama aplenkti kliūtį. Difrakcine bangų energija taip pat yra sukuriama supimąsi sukeliantis momentas. Šios dvi bangų jėgos ir sudaro supimą sukeliančias jėgas.

Reguliarios bangos yra aprašomos panaudojant greičio potencialą. Greičio potencialas  $\phi(x, y, z, t)$  – tai funkcija ar matematinė išraiška su erdvės tašku ir laiko kintamaisiais – galiojanti bet kuriame skysčio taške. Greičio potencialo funkcijos pagrindinė savybė tai, kad bet kuriame skysčio taške šios funkcijos išvestinė yra surandamas skysčio taško greitis. Greičio potencialas harmoniškai svyruojančio skysčio  $x$  kintamojo atžvilgiu užrašomas  $\phi = Ux \cos \omega t$ , tuomet greitis bet kuriame taške  $x$  surandamas  $u = \frac{d\phi}{dx} = U \cos \omega t$ . Jeigu greičio potencialo skaitinę vertę padvigubinsime tokiu pat dydžiu pasikeis ir taško greitis, vadinasi potencialas ir greitis yra tiesiškai proporcingi dydžiai (Journée, et al., 2002, 9 p.).

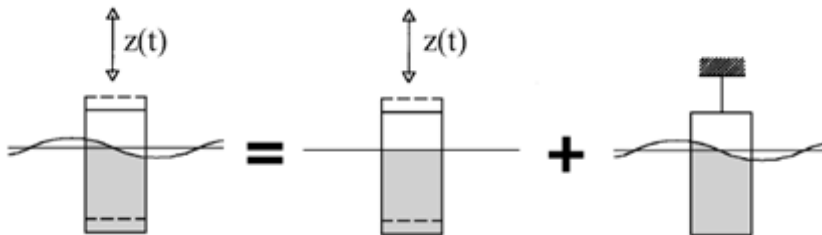
Naudojant linijinę potencialo teoriją yra laikoma, kad vandens paviršiaus liestinė arba bangos statumas yra labai maži. Vandens dalelių harmoniniai poslinkiai, greičiai ir pagreičiai, ir harmoniškai kintantis slėgis yra tiesiškai proporcingi bangos paviršiaus kitimui. Greičio potencialas užrašomas tokia išraiška:

$$\Phi_w = \frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

čia  $\Phi_w$  – greičio potencialas;  
 $\zeta_a$  – bangos aukščio amplitudė;  
 $k$  – bangų skaičiu;  
 $\omega$  – bangos apskritiminis dažnis;

$z$  – vandens gylis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Kai sistema yra linijinė, supimasis reguliariose bangose laikomas kaip superpozicija supimosi ramiame vandenyje ir esant bangavimui suvaržyto supimosi atveju (3 pav.).



3 pav. Hidromechaninių ir bangų jėgų superpozicija

Dvi svarbios prielaidos yra taikomas jėgų skaičiavimui (Journée, et al., 2002, 14 p.) :

- 1) Hidromechaninės jėgos ir momentai yra sukelti harmoniškai besisupančio kieto kūno ramiame vandenyje.
- 2) Bangų jėgos ir momentai atsirandantys bangos profiliui pereinant per įtvirtintą kūną.

Vertikalaus supimosi atveju kietą kūną veikiančios hidromechaninės ir bangų jėgos yra apskaičiuojamos:

$$\rho \nabla \ddot{z} = F_h + F_w \quad (2)$$

čia  $\rho$  – vandens masės tankis;  
 $\nabla$  – povandeninės dalies tūris;  
 $F_h$  – hidromechaninė jėga;  
 $F_w$  – hidrodinaminė jėga;  
 $\ddot{z}$  – vertikalaus supimosi pagreitis.

Hidromechaninės jėgos nustatymui visų pirma yra nagrinėjamas laisvai besisupantis kūnas ramiame vandenyje. Pakėlus cilindą vertikaliai į viršų ir paleidus jį, vertikalus cilindro supimasis slopsta laisvai. Laisvai besisupantis cilindras charakterizuojamas jo mase ir hidromechaninėmis jėgomis, veikiančiomis cilindą. Pritaikant antrąjį Niutono dėsnį vertikaliai besisupančio cilindro lygtis užrašoma taip:

$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad (3)$$

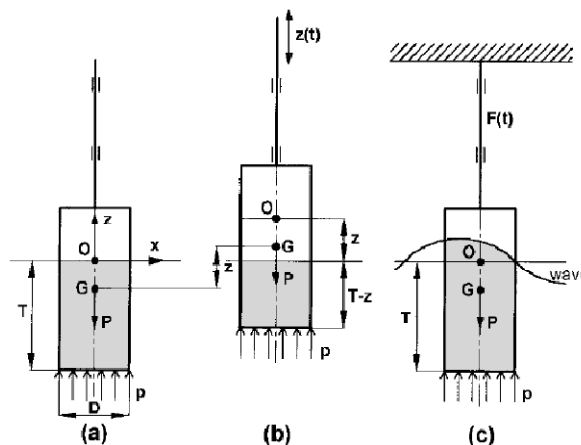
čia  $m$  – cilindro masė;  
 $a$  – hidrodinaminės masės koeficientas;  
 $c$  – atstatančiosios jėgos koeficientas  
 $b$  – dempferavimo koeficientas.

Vertikalus cilindro judėjimas generuoja bangas. Šios bangos perduoda besisupančio kūno energiją, todėl kūno supimasis slopsta. Tai vadinama bangų dempferavimu, bangų dempferavimas linijinėje sistemoje yra proporcingas cilindro vertikalaus judėjimo greičiui.

Kita hidromechaninės jėgos dalis aš yra proporcinga besisupančio cilindro vertikaliajam pagreičiui. Koeficientas  $a$  yra dimensinis dydis vadinamas hidrodinamine vandens mase ir turi masės matavimo vienetus. Bangų jėgos, veikiančios įtvirtintą cilindrą pavaizduotos 4 pav.

Hidromechaninės jėgos yra visos skysčio reakcijos jėgos veikiančios besisupantį cilindrą:

$$F_h = -a\ddot{z} - b\dot{z} - cz \quad (4)$$



4 pav. Bangų jėgos veikiančios vertikaliai besisupanti cilindrą

Pagal klasikine hidromechanikos teoriją reguliarių bangų greičio potencialas ir bangos profilio funkcija užrašoma taip:

$$\begin{aligned} \Phi &= -\frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \\ \zeta &= \zeta_a \cos(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (5)$$

- čia  $\Phi$  – greičio potencialas;  
 $\zeta_a$  – bangos aukščio amplitudė;  
 $\omega$  – bangos apskritiminis dažnis;  
 $z$  – vandens gylis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Slėgis, veikiantis cilindro dugne ( $z = -T$ ), apskaičiuojamas pritaikius linijinę Bernulio lygtį:

$$p = \rho g \zeta_a e^{-kT} \cos(\omega t) + \rho g T \quad (6)$$

- čia  $\rho$  – vandens masės tankis;  
 $\zeta_a$  – bangos aukščio amplitudė;  
 $T$  – grimzlė;

$\omega$  – bangos apskritiminis dažnis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Vertikalia kryptimi į cilindro dugną veikianti jėga apskaičiuojama:

$$F = \left\{ \rho g \zeta_a e^{-kT} \cos(\omega t) + \rho g T \right\} \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

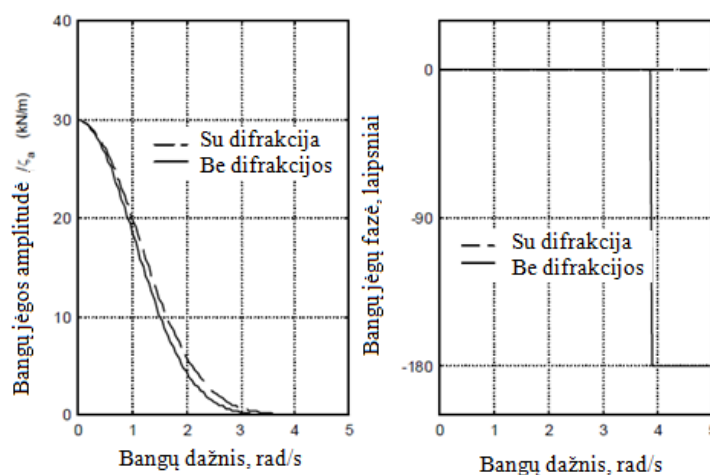
čia  $\rho$  – vandens masės tankis;  
 $\zeta_a$  – bangos aukščio amplitudė;  
 $T$  – grimzlė;  
 $\omega$  – bangos apskritiminis dažnis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  
 $D$  – cilindro diametras.

Harmoninė jėgos  $F$  dalis yra vadinama Frūdo – Krylovo jėga. Dalis bangų nukrypsta nuo tiesiaieigio sklidimo dėl bangų difrakcijos, todėl ši jėga yra koreguojama papildomomis jėgų sudedamosiomis dalimis. Prie jau minėtos jėgos yra pridedamos dar dvi jėgų sudedamosio dalys proporcingos vertikalios supimosi greičiui ir pagreičiui.

$$F_w = a\ddot{\zeta}^* + b\dot{\zeta}^* + c\zeta^* = F_a \cos(\omega t + \varepsilon_{F\zeta}) \quad (8)$$

čia  $\rho$  – vandens masės tankis;  
 $\zeta_a$  – bangos aukščio amplitudė;  
 $\omega$  – bangos apskritiminis dažnis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  
 $F_a$  – bangų jėgos amplitudė;  
 $\zeta^* = \zeta_a e^{-kT} \cos(\omega t)$ ;  
 $c = \rho g \frac{\pi D^2}{4}$ ;  
 $D$  – cilindro diametras.

Bangų jėgos amplitudė ir fazė priklausomai nuo bangų dažnio pavaizduoti 5 pav. Esant mažiems bangų dažniams difrakcinės bangų jėgos įtaka yra maža ir visa bangų jėga yra lygi Frūdo – Krylovo jėgai  $c\zeta^*$ . Esant didesniems bangų dažniams yra pastebima nedidelė difrakcijos įtaka bangų jėgų dydžiui – bangų jėgų amplitudė išlieka lygi Frūdo – Krylovo jėgai. Difrakcinė jėga tampa svarbi kuomet visa bangų jėga yra santykinai maža (Journée, et al., 2002, 43 p.).



5 pav. Vertikali jėga veikianti cilindą

Idealus laivo supimosi skaičiavimų metodas (kompiuterinė programa) turi įvertinti (Walree, et al., 2010):

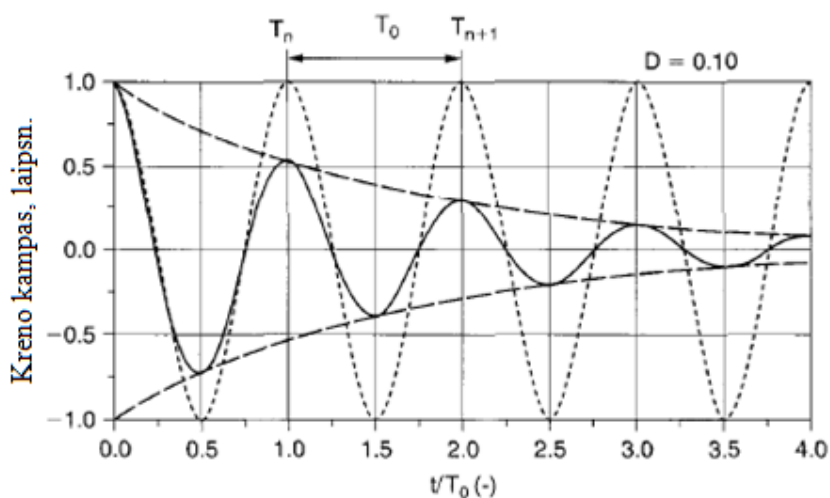
1. Svyravimus visais šešiais laisvės laipsniais, ypač sudėtinį kartu vykstantį judėjimą (sąryšį tarp siūbavimo bortinio supimosi ir kt.);
2. Netiesinė priklausomybė kintančias bangas: dinaminio stabilumo problema labiausiai aktuali stačiose bangose, dėl to nelinejinis efektas ypač svarbus;
3. Laike kintantį laivo povandeninės dalies plotą ir jo įtaką atstatančiosioms jėgoms, bangų difrakciją, bangų atspindžio jėgas;
4. Denio krašto panėrimą į vandenį ir dinamines vandens charakteristikas ant denio;
5. Laivo greitį, trinties efektą laivui plaukiant taip pat skysčio atitrūkimą ir jo įtaka hidrodinaminėms savybėms;
6. Laivo varytuvo ir vairo įtaką;
7. Vėjo įtaką bortinio supimosi dempferavimui ir bortinio supimosi sužadimui.

Jėgos veikiančios supimosi metu skirstomos į inercines, dempferuojančiąsias, atstatančiąsias ir supimą sukeliančias jėgas. Laivui supantis šios jėgos kinta, todėl skaičiuojant laivo supimą šis kitimas turėtų būti įvertinamas.

Jing-puchen, De-xiang Zhu pritaikė metodą skaičiuoti bortinį supimą panaudojant linijinį dempferavimo momento skaičiavimo matematinį modelį. Metodo galimybių įvertinimui buvo atliktas konteinervežio modelio „Flokstra“ supimosi eksperimentas reguliariose bangose. Reguliarios bangos buvo generuojamos įvairių krypčių, eksperimento rezultatai pateikti esant įstrižam bangavimui. Tiriamojo laivo greitis buvo 10 ir 22 mazgai. Atliekant eksperimentą vienai bangų kryptiai buvo generuojama po 15 skirtingų reguliarių bangų, kurių ilgio santykis su laivo ilgiu ( $\lambda/L = 0,4-3,5$ ), o aukštis išlaikytas pastovus 70 mm. Atlikus skaičiavimus „Rankine panel metodu“ rezultatai parodė, kad šiuo metodu galima pakankamai tiksliai įvertinti vertikaluji

supimasi, tačiau bortinio supimosi atveju skaičiavimai nėra patikimi. Autoriai teigia, kad taip gaunama dėl bortinio supimosi dempferavimo netiesiškumo – pasireiškia netolygus klampumo efektas (Puchen et al., 2010).

Laisvai besisupančio laivo svyravimai laikui einant slopsta. Svyravimų slopinimas vyksta dėl dempferuojančių jėgų veikimo (6 pav.). Dempferuojančiosios jėgos atsiranda dėl vandens klampumo. Jeigu laivą veikia didesnės dempferuojančiosios jėgos, jo supimosi amplitudė yra mažesnė ir svyravimai greičiau užgęsta.

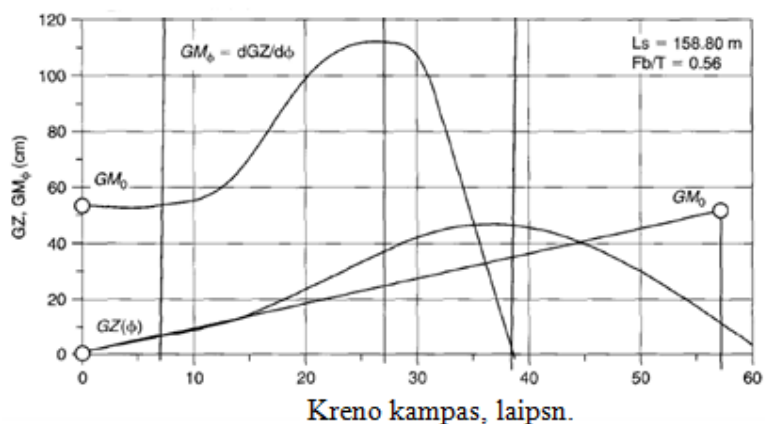


6 pav. Laivo slopstančių svyravimų kreivė

Supimosi metu veikiančių jėgų dydis labai priklauso ir nuo laivo povandeninės dalies korpuso formos. Nustatyta, kad aštriabriaunių skerspjūvių dempferavimo koeficientas ir hidrodinaminė vandens masė yra didesnė už aptakios formos skerspjūvį, taip yra dėl didesnio sukūrių dempferuojančio poveikio, kuriuos labiau sukelia aštriabriaunės skerspjūvių formos (Jaouen et al., 2011). Jeigu aštriabriaunių skerspjūvių hidrodinaminė vandens masė yra didesnė vadinasi inercinės jėgos taip pat bus didesnės.

Atstatančiosios jėgos gražinančios laivą į pusiausvyros padėtį veikia kaip linijinė sistema iki tam tikros nedidelės (bortinio supimosi atveju iki 5 laipsnių) supimosi amplitudės. Esant didesniai amplitudei nagrinėjant bortinį laivo supimą laivo metacentrinis aukštis kinta nebe tiesine priklausomybe, vadinasi ir atstatantysis momentas keičiasi netiesine priklausomybe (7 pav.) (Molland, 2008).

Bortinio supimosi atveju esant didelėms supimosi amplitudėms statinio stovumo petys priklausomai nuo kreno kampo kinta netiesiškai. Didėjant kreno kampui statinio stovumo petys artėja iki maksimumo. Pasiekus maksimumą statinio stovumo petys pradeda sparčiai mažėti kol pasiekama nulinė peties reikšmė.



7 pav. Statinio stovumo pečių diagrama ir pečių kitimas priklausomai nuo kreno

Skirtingos statinio stovumo diagramos zonos yra charakterizuojamos gradientu  $dGZ/d\phi = GM$ . Suradus statinio stovumo peties  $GZ$  gradientą, galima nubrėžti grafiką vaizduojanti kaip kinta laivo metacentrinis aukštis priklausomai nuo kreno kampo (7 pav.). Daugeliui laivų esant krenui iki 5 laipsnių gradientas yra pastovus, vadinasi metacentrinis aukštis irgi lieka pastovus. Tiesinis metacentrinio aukščio kitimas priklauso nuo korpuso povandeninės dalies formos vaterlinijos zonoje. Pradinis metacentrinis aukštis  $GM_0$  – tai statinio stovumo peties gradientas laivui nepasvirus.

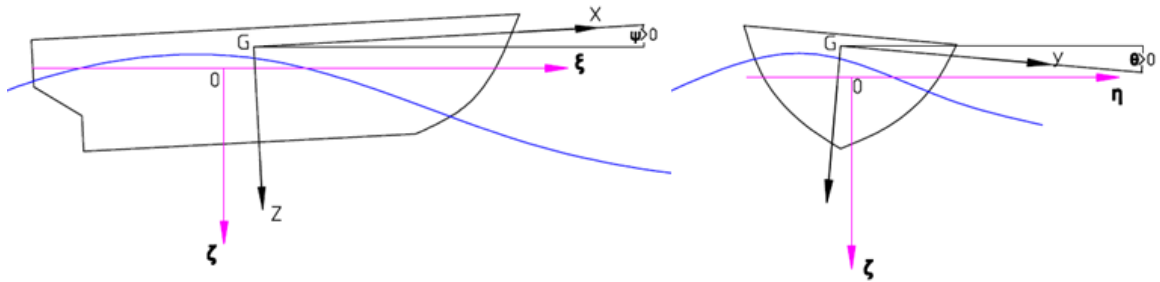
Didelis pradinis metacentrinis aukštis užtikrina laivo stovumą, laivas nėra jautrus kreną sukeliančiam momentui, priešingu atveju kai metacentrinis aukštis yra mažas – laivas tampa jautrus krenuojančiam momentui. Skaičiuojant laivo supimąsi turi būti įvertinamas statinio stovumo diagramos netiesinis kitimas priklausomai nuo kreno kampo.

Išankstiniam laivo supimosi vertinimui dažniausiai yra taikomos klasikine ir hidrodinamine laivo supimosi teorija paremtos skaičiavimų metodikos. Kurią metodiką pasirinkti sprendžiama pagal gautų rezultatų kokybę. Nustatyti metodikos prognozavimo galimybes galima palyginus skaičiavimų rezultatus su eksperimento duomenimis. Šių metodikų prognozavimo galimybes įvertinsime karinio laivo DTMB 5415 supimosi skaičiavimu reguliariose bangose. Skaičiavimų rezultatus palyginsime su eksperimento duomenimis.

## 1.2 Laivo supimosi vertinimas klasikinės teorijos pagrindu

Skaičiuojant laivo supimąsi pagal klasikinę supimosi teorija yra sprendžiama supimąsi aprašanti diferencialinė lygtis (Отраслевой стандарт, 1981) . Išsprendus diferencialinę lygtį (11 lygtis) gaunama supimąsi aprašanti funkcija priklausomai nuo supimosi amplitudės, bangos dažnio, laiko ir fazės (12 lygtis). Pradiniai duomenys yra reikalingi šie: Laivo pagrindiniai matmenys, formos

koeficientai, svorio centro koordinatės, bangavimo parametrai. Koordinačių sistemos naudojamos supimosi skaičiavimuose yra dvi: fiksuota ir judanti kartu su laivo svorio centru (8 pav.).



8 pav. Koordinačių ašys

Bangos aukštis apskaičiuojamas pagal Cimermano formulę:

$$h_b = 2r_b = 0,17\lambda^{3/4}, \quad (9)$$

čia  $h_b$  – bangos aukštis;  
 $r_b$  – bangos amplitudė.

Bangos nuolydžio amplitudė:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi r_b}{\lambda}, \quad (10)$$

čia  $\alpha_0$  – bangos nuolydžio amplitudė;  
 $r_b$  – Bangos aukščio amplitudė;  
 $\lambda$  – bangos ilgis.

Bortinis ir vertikalaus supimosi diferencialinės lygtys yra panašios kintamųjų atžvilgiu, todėl plačiau panagrinėsime bortinio supimosi skaičiavimą. Bortinio supimosi diferencialinė lygtis su nežinomais koeficientais užrašoma taip:

$$\ddot{\theta} + 2\nu(\dot{\theta}_0)\dot{\theta} + n_0^2\theta = n_0^2K\alpha_0\sin(\omega_k t), \quad (11)$$

čia  $\ddot{\theta}$  – kampinis pagreitis;  
 $\dot{\theta}$  – kampinis greitis;  
 $2\nu$  – dempferavimo koeficientas;  
 $n_0$  – nuosavųjų svyravimų dažnis;  
 $K$  – redukcinis koeficientas;  
 $\omega_k$  – bangos dažnis;  
 $\alpha_0$  – Bangos nuolydžio kampas.

Supimosi amplitudė apskaičiuojama:

$$\theta_0 = K_\theta \alpha_0 \sqrt{\frac{(1 - q_\theta \chi_0^2)^2 + 4v_\theta^2 \chi_0^2}{(1 - \chi_0^2)^2 + 4v_\theta^2 \chi_0^2}}, \quad (12)$$

- čia  $\chi_0$  – santykinis dažnis;  
 $K_\theta$  – redukcinis koeficientas;  
 $v_\theta$  – dempferavimo koeficientas  
 $q_\theta = \frac{k_\theta}{1 + k_\theta}$ ;  
 $k_\theta = \frac{\lambda_{4,4}}{I_{x,x}}$ ;  
 $\lambda_{4,4}$  – virtualiosios masės koeficientas.

Bortinio supimosi lygties sprendinys:

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega_k t - \varepsilon_\theta), \quad (13)$$

- čia  $\theta_0$  – bortinio supimosi amplitudė;  
 $\omega_k$  – bangos dažnis;  
 $\theta$  – kreno kampas;  
 $\varepsilon_\theta$  – fazės kampas.

Supimosi amplitudei apskaičiuoti reikalinga apskaičiuoti papildomus dydžius ty., virtualiosios masės, redukcinį, dempferavimo koeficientus. Šie koeficientai nustatomi pagal specialias nomogramas arba matematinės išraiškas priklausomai nuo korpuso formos tipo.

### 1.3 Skerspjuvių metodas paremtas greičio potencialo teorija

Bangos profilis matematiškai gali būti aprašomas *sin* ir *cos* funkcijomis, tačiau šios funkcijos aprašančios bangos profilį taikomos tik mažo statumo bangoms, nes didelio statumo bangų profilio formos šios funkcijos pakankamai tiksliai nebegali atvaizduoti (Journée, et al., 2003).

Bangų profilio lygtis užrašoma taip:

$$\zeta = \zeta_a \cos(\omega t), \quad (14)$$

- čia  $\zeta_a$  – bangos amplitudė, m;  
 $k$  – bangų skaičius;  
 $\omega$  – bangos dažnis;  
 $t$  – laikas.

Laivo supimasis aprašomas ir skaičiuojamas pagal diferencialines lygtis.

Vertikalaus supimosi diferencialinė lygtis įvertinanti kartu vykstantį kilinį supimąsi:

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega_e t}, \quad (15)$$

- čia  $M$  – laivo masė;  
 $A_{33}$  – hidrodinaminė vandens masė;  
 $\ddot{\eta}_3$  – vertikalus supimosi pagreitis;  
 $B_{33}$  – vertikalaus supimosi dempferavimo koeficientas  
 $\dot{\eta}_3$  – vertikalaus supimosi greitis;  
 $C_{33}$  – vertikalaus supimosi atstatantysis momentas;  
 $\eta_3$  – vertikalus poslinkis;  
 $A_{35}$  – kilinio supimosi hidrodinaminė vandens masė;  
 $\ddot{\eta}_5$  – vertikalaus supimosi pagreitis;  
 $B_{35}$  – kilinio supimosi dempferavimo koeficientas  
 $C_{35}$  – kilinio supimosi atstatantysis momentas;  
 $\eta_5$  – diferento kampas, laipsniai.

Kilinio supimosi diferencialinė lygtis lygtis įvertinanti kartu vykstantį vertikalų supimąsi:

$$(I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega_e t}, \quad (16)$$

- čia  $I_5$  – inercijos momentas y ašies atžvilgiu;  
 $A_{55}$  – hidrodinaminės vandens masės inercijos momentas;  
 $\ddot{\eta}_5$  – diferento kampinis pagreitis;  
 $B_{55}$  – kilinio supimosi dempferavimo koeficientas  
 $\dot{\eta}_5$  – kilinio supimosi greitis;  
 $C_{55}$  – kilinio supimosi atstatančiosios jėgos koeficientas  
 $\eta_5$  – diferento kampas;  
 $A_{53}$  – vertikalaus supimosi hidrodinaminės masės inercijos momentas;  
 $\ddot{\eta}_3$  – vertikalus supimosi pagreitis;  
 $B_{53}$  – vertikalaus supimosi dempferavimo koeficientas  
 $\dot{\eta}_3$  – vertikalaus supimosi greitis;  
 $C_{53}$  – vertikalaus supimosi atstatančiosios jėgos koeficientas;  
 $\eta_3$  – vertikalus poslinkis;

Bortinio supimosi diferencialinė lygtis:

$$(I_4 + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 = F_4 e^{i\omega_e t}, \quad (17)$$

- čia  $I_4$  – inercijos momentas x ašies atžvilgiu;  
 $A_{44}$  – hidrodinaminės vandens masės inercijos momentas;  
 $F_4$  – supimąsi sukianti jėga;  
 $\eta_4$  – kreno kampas, laipsniai;  
 $C_{44}$  – bortinio supimosi atstatantysis momentas;  
 $\ddot{\eta}_4$  – kampinis pagreitis;  
 $\dot{\eta}_4$  – kampinis greitis.

Diferencialinės lygtis susideda iš keturių jėgų: supimą sukeliančių, inercinių, dempferuojančių ir atstatančiųjų jėgų.

Anstatantysis momentas bortinio supimosi diferencialinėje lygtyje:

$$C_{4 \text{ z}} = \frac{M}{\phi} = \frac{g\Delta GM\phi}{\phi} = F_B GM, \quad (18)$$

čia  $M$  – atstatantysis momentas;  
 $\phi$  – kreno kampas, laipsniais;  
 $\Delta$  – laivo vandentalpa;  
 $GM$  – laivo metacentrinis aukštis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  
 $F_B$  – plūdrumo jėga.

Kilinio supimosi atveju į pusiausvyros padėtį laivą gražina atstatantysis momentas. Šiuo atveju jis lygus laivo plūdrumo jėgos ir išilginio statinio stovumo peties sandaugai:

$$C_{5 \text{ z}} = \frac{M_L}{\psi} = \frac{g\Delta GM_L \psi}{\psi} = F_B GM_L, \quad (19)$$

čia  $GM_L$  – išilginis metacentrinis aukštis;  
 $\Delta$  – laivo vandentalpa;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  
 $\psi$  – diferento kampas, laipsniai.

Hidrostatinė vertikalaus supimosi atstatančioji jėga:

$$C_{3 \text{ z}} = \rho g A_w \zeta, \quad (20)$$

čia  $A_w \zeta$  – vatelinijos plotas;  
 $\zeta$  – grimzlė;  
 $\rho$  – vandens masės tankis;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Diferencialinė lygtis aprašanti bortinį supimąsi ramiam vandenyje užrašoma taip:

$$\ddot{\theta} + 2\delta\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0, \quad (21)$$

čia  $\ddot{\theta}$  – kampinis pagreitis;  
 $\dot{\theta}$  – kampinis greitis;  
 $\omega_0$  – nuosavų svyravimų dažnis;  
 $\theta$  – kreno kampas.

Šios lygties sprendinys:

$$\theta = \theta_0 \exp(-\delta t) \cos\omega_0 t, \quad (22)$$

čia  $\theta$  – kreno kampas, laipsniai;  
 $\delta$  – dempferavimo koeficientas;  
 $\theta_0$  – kreno kampo amplitudė, laipsniai;  
 $\omega_0$  – nuosavų svyravimų dažnis;  
 $\delta = \frac{b}{2a}$ ;

b – dempferuojančios jėgos;  
a – inercinės jėgos.

Bortinio supimosi dempferavimo koeficientas gali būti surandamas atlikus eksperimentą iš gautos slopstančių svyravimų kreivės apskaičiuojamas taikant šią formulę:

$$\delta = \frac{1}{T_0} \ln \left( \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} \right), \quad (23)$$

čia  $\delta$  – dempferavimo koeficienta;  
 $T_0$  – laivo svyravimų periodas;  
 $\theta_n, \theta_{n+1}$  – kreno kampo amplitudės, laipsniais.

Bedimensinis dempferavimo koeficientas užrašomas taip:

$$D = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{b}{2\sqrt{ac}}, \quad (24)$$

čia  $D$  – bedimensinis dempferavimo koeficienta;  
 $\omega_0$  – nuosavų svyravimų dažnis;  
 $c$  – Atstatančioji jėgos momentas;  
 $b$  – dempferuojančios jėgos.

Dempferuojančių jėgų ir hidrodinaminės masės koeficientai gali būti skaičiuojami pagal šiuos metodus (Journée, et al., 2003):

1. Tasai teorija paremta Ursell potencialo teorija apskritimo formos cilindriui pritaikant Lewis sekcijų transformacijos funkciją.
2. Keil'o teorija paremta Ursell potencialo teorija apskritimo formos cilindriui pritaikant Lewio sekcijų transformacijos funkciją.
3. Frank'o teorija.

Lewio sekcijų transformacijos funkcija yra aprašomas korpuso skerspjūvio kontūras kaip funkcija nuo tam tikrų parametų. Šie parametrai apskaičiuojami taip:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{d}{1 - a_1 + a_2}, \\ a_1 &= (1 + a_2) \frac{H - 1}{H + 1}, \\ a_2 &= \frac{3 - C + \sqrt{9 - 2C}}{C}, \\ C &= 3 + \frac{4\sigma}{\pi} + \left(1 - \frac{4\sigma}{\pi}\right) \left(\frac{H - 1}{H + 1}\right), \\ \sigma &= \frac{\omega}{Bd'}, \\ H &= \frac{B}{2d'} \end{aligned}$$

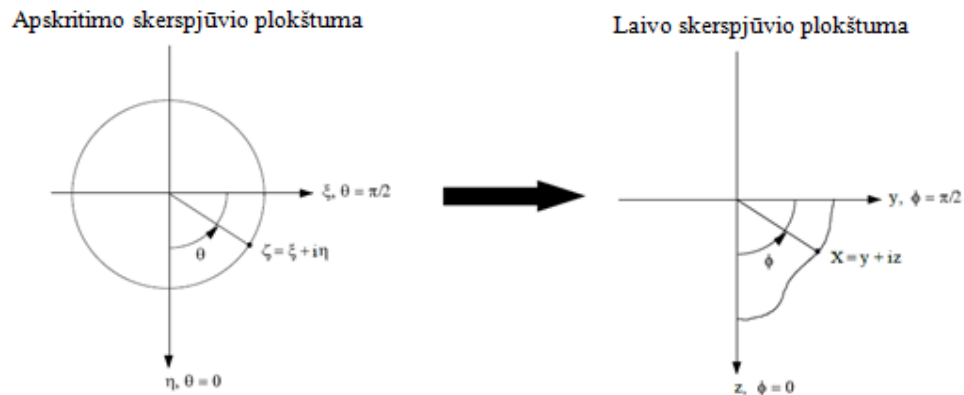
(25)

čia  $B$  – laivo ilgis;  
 $d$  – laivo grimzlė;  
 $\omega$  – skersinio skerspjuvio plotas.

Transformuotos simetriškos daugiaparametrinis skerspjuvio taškas laivo skersinių pjūvių plokštumoje ( $y, z$ ) aprašomas kampu  $\theta$  nuo teigiamos  $\eta$  ašies (9 pav.):

$$\begin{aligned} y &= a_0[\sin\theta + a_1\sin\theta - a_2\sin3\theta + a_3\sin5\theta + \dots - (-1)^2 a_n \sin(2n-1)\theta], \\ z &= a_0[\cos\theta + a_1\cos\theta - a_2\cos3\theta + a_3\cos5\theta + \dots + (-1)^2 a_n \cos(2n-1)\theta], \end{aligned}$$

(26)



9 pav. Lewio sekcijų transformavimo schema

Lewis skerspjuvių transformavimo funkcija yra naudojama greičio potencialų funkcijų sudarymui pagal kurias yra apskaičiuojami dempferavimo koeficientai ir hidrodinaminė vandens masė. Hidrodinaminė vandens masė „Seakeeper“ programoje bortiniam supimuisi apskaičiuojama taip:

$$A_{4z} = 0.3I_{4z}, \quad (27)$$

čia  $I_{4z}$  – laivo masės inercijos momentas;  
 $A_{4z}$  – hidrodinaminė vandens masė.

Vertikalūs ir kilinis laivo supimasis skaičiuojamas sudalinant laivo korpusą į skaičių skersinių pjūvių taip skaičiuojamas veikiančios bangų jėgos poveikis kiekvienam skerspjuviui. Dviejų dimensijų sistemoje hidrodinaminė vandens masė, dempferavimo ir atstatančiosios jėgos koeficientai yra surandami integruojant pagal visą laivo ilgį. Priimama, kad laivo supimosi amplitudė yra maža – laivo supimasis išlieka tiesiškai proporcingas bangos aukščio amplitudei. Globalūs hidrodinaminės vandens masės ir dempferavimo koeficientai skaičiuojami pagal metodą sukurtą Selvesen (Formation Design Systems, 2009).

Hidrodinaminė vandens masė ir dempferavimo koeficientai apskaičiuojami paganaudojant Lewis skerspjuvių transformavimo funkciją ir greičio potencialo teoriją. Bendru atveju šie koeficientai apskaičiuojami:

$$A_{3 \xi} = \int a_{3 \xi} d\xi \quad (28)$$

čia  $A_{3 \xi}$  – hidrodinaminė vandens masė;

$$a_{3 \xi} = \frac{\rho b^2 (M_0 B + N_0 A)}{2(A^2 + B^2)};$$

$a_{3 \xi}$  – skerspjūvio hidrodinaminė vandens masė.

$$B_{3 \xi} = \int b_{3 \xi} d\xi \quad (29)$$

čia  $B_{3 \xi}$  – dempferavimo koeficienta;

$$b_{3 \xi} = \frac{\rho b^2 \omega \pi^2}{4(A^2 + B^2)};$$

$b_{3 \xi}$  – skerspjūvio dempferavimo koeficienta.

$$A_{5 \xi} = \int \xi^2 a_{3 \xi} d\xi + \frac{U^2}{\omega_e^2} A_{3 \xi} \quad (30)$$

$$B_{5 \xi} = \int \xi^2 b_{3 \xi} d\xi + \frac{U^2}{\omega_e^2} B_{3 \xi} \quad (31)$$

Hidrodinaminė vandens masė ir dempferavimas turi būti skaičiuojami naudojant bangų dažnį, taip pat ir bangų skaičius  $k$  turi būti apskaičiuotas pagal šį dažnį. Tokiu būdu yra atliekami skaičiavimai nes laikoma, kad laivas supasi vandenyje ir taip generuoja bangas, kurios sukuria dempferavimą ir prideda papildomą hidrodinaminę vandens masę.

Sprendžiant tarpusavyje vykstanti vertikalių ir kilinių laivo supimąsi reikalinga apskaičiuoti tik globalią bangų jėgą ir momentą, tačiau sprendimui reikalinga apskaičiuoti bangų kirpimo jėgą (*angl. Shear force*) ir lenkimo momentą. Jėgos yra suskirstomos į: skerspjūvių Frūdo – Krylovo ir difrakcines jėgas. Globaliai bangų jėgai ir momentui apskaičiuoti yra taikoma keletas supaprastinimų, todėl šioms jėgoms skaičiuoti yra taikomi trys metodai (Formation Design Systems, 2009): Įvairių bangų kryptių, laivapriekio krypties bangoms ir Selvesen metodas. Skaičiavimus atliksime metodu skirtu skaičiuoti įvairių kryptių bangų jėgą (*angl. arbitrary wave Heading*).

#### 1.4 Supimosi skaičiavimai paremti hidrodinamine supimosi teorija

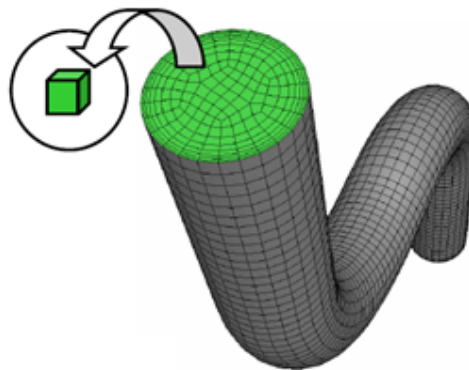
Skaičiuojamoji skysčių dinamika (*angl. Computational fluid dynamics*) – tai mokslo šaka, analizuojanti skysčio tekėjimo ypatybes, šilumos perdavimą, chemines reakcijas ir kitus panašius reiškinius. Pagrindinis CFD metodo privalumas tyrimo laiko sąnaudų sumažinimas lyginant su eksperimentu. CFD skaičiavimų rezultatai naudojami:

1. Detaliam produkto kūrimui;

2. Galimų problemų nustatymui;
3. Konceptiniams naujų projektuojamų objektų tyrimams.

CFD analizė pradedama nuo matematinio modelio fizinės problemos formulavimo. Skysčio fizinės savybės yra modeliuojamos empiriškai. Priimami supaprastinimai leidžiantys matematiškai aprašyti problemą (pvz. skysčio savybė – nespūdumas) ir užduodamos pradinės sąlygos problemos sprendimui.

CFD metodas yra parentas skaičiavimų metodais vadinamais diskretizacija, kurie yra taikomi skysčio mechanikos skaičiavimų pagrindinės lygties aproksimacijų apskaičiavimui nagrinėjamame skysčio regione. Skaičiavimų masyvas yra apibrėžiamas baigtiniu skaičiumi elementų (10 pav.).



10 pav. Skaičiavimų masyvas

Diskretizuotame skaičiavimų masyve dar vadiname skaičiavimų tinkleliu (angl. Mesh) yra apskaičiuojamos algebrinės lygčių sistemos aprašančios skysčio tekėjimą kiekviename elemente. Diskretizuota tvermės lygtis yra sprendžiama iteracijų būdu. Tam tikras skaičius iteracijų dažniausiai reikalingas patikimam sprendimo rezultatui pasiekti. Sprendimas gaunamas kai:

1. Sprendimo kintamųjų skirtumas po tam tikro skaičiaus iteracijų yra nedidelis;
2. Pasiekiamas bendras tvermės lygties sprendinys.

Skaičiavimų tikslumas priklauso nuo fizinio modelio tinkamumo ir jo tikslumo, skaičiavimų tinklelio kokybės, problemos pradinių duomenų korektiško uždavimo (Bakler A., 2006)

Supimosi skaičiavimus atliksime kompiuterine programa „FLOW-3D“. Ši kompiuterinė programa naudoja RANS (angl. Reynolds averaged Navier – Stokes simulation) skaičiavimų algoritmą skirtą skaičiuoti skysčio srautą tekantį aplink kūną. Dekarto koordinatų sistemoje inertiškai sistemai tęstinumo ir momento lygtis bedimense forma užrašoma taip (Weymouth., et al, 2005) :

$$\frac{dU_i}{dx_i} = 0$$

$$\frac{dU_i}{dt} + U_j \frac{dU_i}{dx_j} = -\frac{d\hat{p}}{dx_i} + \frac{1}{Re} \frac{d^2 U_i}{dx_j dx_j} - \frac{d}{dx_j} \overline{u_i u_j}$$

(32)

čia  $U_i = (U, V, W)$  – greičio komponentai;

$x_i$  – nepriklausomos koordinatės;

Re – reinoldso skaičius;

$p = \left[ \frac{(p - p_\infty)}{\rho U_0^2} + \frac{z}{Fr^2} \right]$  – pjezometrinio slėgio koeficientas

$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gL}}$ ;

$Re = \frac{U_0 L}{\nu}$ ;

Fr – frūdo skaičius;

Re – reinoldso skaičius;

$U_0$  – laivo greitis;

L – laivo ilgis;

g – laisvojo kritimo pagreitis;

$\nu$  – skysčio klampumas;

$\rho$  – vandens masės tankis.

## II. EMPIRINĖ DALIS

### 2.1 Laivo supimosi skaičiavimas pagal klasikinę supimosi teoriją

Bangos aukštis skaičiuojamas pagal Cimermano formulę priklausomai nuo bangos ilgio. Atsižvelgiant į eksperimento bangų parametrus pagal bangos aukštį surandame bangos ilgį. Turint bangos ilgį yra apskaičiuojami bangų dažniai ir periodai (1 lentelė).

1 lentelė. Nustatyti bangų parametrai

$\lambda$	56	76	100	126	141	156	172	189	225	264	306	351	400	624	465	534
$\lambda_C$	12	19	27	37	42	48	55	63	79	98	119	143	170	308	207	250
H	1.12	1.53	2	2.53	2.82	3.12	3.44	3.78	4.5	5.28	6.12	7.03	7.99	12.49	9.29	10.69
$\alpha_0$	16.3	14.7	13.4	12.4	12.0	11.6	11.2	10.9	10.3	9.7	9.3	8.8	8.5	7.3	8.1	7.7
$\sigma$	2.23	1.81	1.52	1.30	1.21	1.13	1.06	0.99	0.88	0.79	0.72	0.66	0.60	0.45	0.55	0.50
$\tau$	2.8	3.5	4.1	4.8	5.2	5.6	5.9	6.3	7.1	7.9	8.7	9.6	10.4	14.0	11.5	12.7
<p>H – bangos aukštis, m  <math>\lambda</math> – bangos ilgis perskaičiuotas iš eksperimento duomenų, m;  <math>\lambda_C</math> – bangos ilgis apskaičiuotas pagal Cimermano formulę, m;  <math>\alpha_0</math> – bangos nuolydžio amplitudė, laipsniai;  <math>\sigma</math> – bangos dažnis, <math>\frac{1}{s}</math>;  <math>\tau</math> – bangos periodas, s.</p>																

Skaičiuojant pagal šią metodiką pastebime, kad yra išlaikyti ne visi vienodi bangavimo parametrai lyginant su eksperimento bangų parametrais perskaičiuotais į realias sąlygas.

Tiriamą laivo bortinio supimosi dempferavimo koeficientas skaičiuojamas pagal Morenšild metodą, redukcinis koeficientas surandamas pagal Smirnovą metodą. Skaičiavimų rezultatai bortiniam ir vertikaliajam supimuisi pateikiami 2 ir 3 lentelės. Kompiuterine programa paremta klasikine supimosi teorija skaičiavimų rezultatai pateikiami kompaktiniame diske.

2 lentelė. Bortinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai

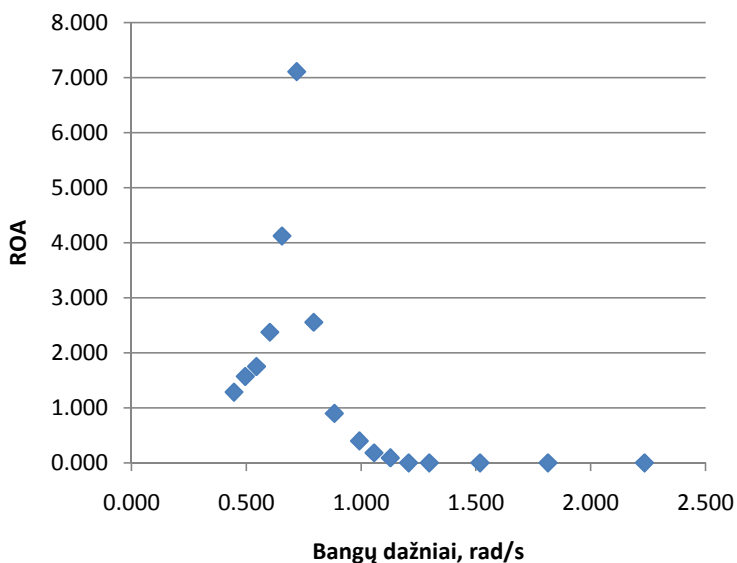
Bangavimo charakteristikos								
Bangos aukštis, m	1.12	1.53	2	2.53	2.82	3.12	3.44	3.78
Bangos ilgis, m	12	18	26	36	42	48	55	62
Bangos periodas, s	2.8	3.5	4.1	4.8	5.2	5.6	5.9	6.3
Bangos nuolydžio kampas, laipsn.	16	14	13	12	11	11	11	10
Bangos dažnis, 1/s	2.234	1.814	1.518	1.297	1.207	1.128	1.057	0.993
Bortinio supimosi charakteristikos								
1. Periodas, s	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
2. Amplitude, laipsn.	0	0	0	0	0	1	2	4
3. Dempferavimo koeficientas	6.15E-03	6.22E-03	6.07E-03	6.02E-03	6.35E-03	6.79E-03	7.39E-03	8.22E-03
4. Redukcinis koeficientas	0.18	0.323	0.454	0.561	0.607	0.646	0.681	0.713
5. Virt. mases momentas, $tm^2$	147082	147082	147082	147082	147082	147082	147082	147082

6. Virtualios masės koeficientas	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
7. Fazės kampas beta, laipsn.	178.7	177.7	173.7	12.1	5.5	3.8	3.1	2.7
8. Fazės kampas gama, laipsn.	179.8	179.7	179.6	179.5	179.3	179.2	178.9	178.6
RAO $\theta$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.091	0.182	0.400
RAOZ	-2.154	-3.326	-9.091	14.056	5.875	3.467	2.389	1.800
<b>Vertikalaus supimosi charakteristikos</b>								
1. Periodas, s	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
2. Amplitudė, m	-0.26	-0.23	-0.11	0.09	0.24	0.45	0.72	1.05
3. Dempferavimo koeficientas	0.5219	0.4188	0.3588	0.3212	0.3074	0.2963	0.2869	0.2788
4. Redukcinis koeficientas	-0.732	-0.47	-0.162	0.09	0.193	0.281	0.359	0.427
5. Virtuali masė, t	11611.5	11656.6	11683	11699.6	11705.6	11710.6	11714.7	11718.3
6. Virtualios masės koeficientas	1.319	1.324	1.327	1.329	1.33	1.331	1.331	1.331
7. Fazės kampas beta, laipsn.	127.3	118.7	104.4	85.3	75.3	66	57.6	50.3
8. Fazės kampas gama, laipsn.	149.1	145.7	139	127.7	119.6	109.8	98.2	85.6
H/ $\lambda$	0.091	0.085	0.077	0.070	0.067	0.007	0.063	0.061

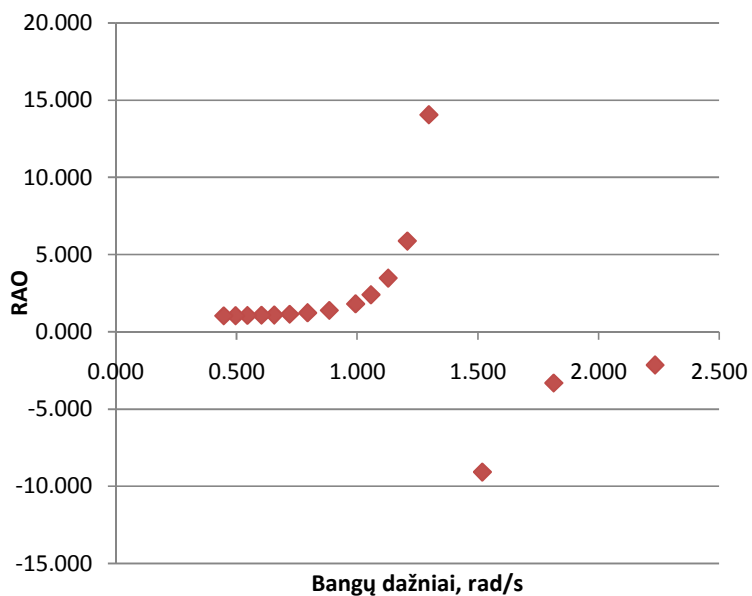
3 lentelė. Bortinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai

<b>Bangavimo charakteristikos</b>								
Bangos aukštis, m	4.5	5.28	6.12	7.03	7.99	9.29	10.69	12.49
Bangos ilgis, m	78	97	118	143	169	207	250	307
Bangos periodas, s	7.1	7.9	9.0	9.6	10.4	11.5	12.7	14.0
Bangos nuolydžio kampas, laipsn.	10	9	9	8	8	8	7	7
Bangos dažnis, 1/s	0.884	0.794	0.720	0.656	0.603	0.545	0.496	0.447
<b>Bortinio supimosi charakteristikos</b>								
1. Periodas, s	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
2. Amplitudė, laipsn.	9	23	64	33	19	14	11	9
3. Dempferavimo koeficientas	1.11E-02	1.98E-02	2.13E-02	2.51E-02	1.74E-02	1.41E-02	1.26E-02	1.16E-02
4. Redukcinis koeficientas	0.765	0.805	0.837	0.863	0.883	0.903	0.919	0.934
5. Virtualios masės momentas, tm <sup>2</sup>	147082	147082	147082	147082	147082	147082	147082	147082
6. Virtualios masės koeficientas	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
7. Fazės kampas beta, laipsn.	2.7	3.8	3.4	3.4	2.1	1.5	1.1	0.9
8. Fazės kampas gama, laipsn.	176.9	168.5	85.1	14.9	5.5	2.9	1.9	1.3
RAO $\theta$	0.900	2.556	7.111	4.125	2.375	1.750	1.571	1.286
RAOZ	1.380	1.222	1.133	1.085	1.071	1.051	1.040	1.029
<b>Vertikalaus supimosi charakteristikos</b>								
1. Periodas, s	6.3	6.5	6.7	7	7	7.3	7.6	8
2. Amplitudė, m	1.63	2.16	2.7	3.24	3.73	4.42	5.14	6.07
3. Dempferavimo koeficientas	0.2857	0.2822	0.2707	0.2502	0.2612	0.2429	0.2271	0.2032
4. Redukcinis koeficientas	0.536	0.62	0.684	0.735	0.775	0.815	0.846	0.874
5. Virtuali masė, t	12389.5	13899.1	15239.7	17437.7	17436.3	19578.9	22063.4	25231.4
6. Virtualios masės koeficientas	1.408	1.579	1.731	1.981	1.981	2.225	2.507	2.867
7. Fazės kampas beta, laipsn.	43.1	38.5	33.6	29.6	26.6	23	20.2	16.9
8. Fazės kampas gama, laipsn.	66.9	55.4	45.4	38.3	32.6	27.1	23.1	18.8
H/ $\lambda$	0.058	0.054	0.052	0.049	0.047	0.045	0.043	0.041

Pagal skaičiavimų duomenis sudarome bortinio ir vertikalaus supimosi amplitudines dažnines charakteristikas (11 ir 12 pav.).



11 pav. Bortinio supimosi dažninė charakteristika



12 pav. Vertikalaus supimosi dažninė charakteristika

**Išvados:**

Bortinio supimosi atveju rezonansas vyksta esant bangos dažniui 0.72 rad/s. Bangos aukštis 6.12 m, bangos ilgis 118 m, bangos periodas 9 s. Šių parametų bangos sukels intensyviausią laivo supimąsi.

Vertikalaus supimosi atveju intensyviausias supimasis vyks prie 1.197 rad/s bangos dažnio. Intensyviausią vertikalų supimąsi sukels bangos, kurių parametrai yra šie: bangos aukštis 2.53 m, bangos ilgis 36 m, bangos periodas 4.8 s.

## 2.2 Laivo supimosi skaičiavimas „Seakeeper“ kompiuterine programa

Supimosi skaičiavimus atliksime hidrodinaminės supimosi teorijos pagrindu paremta kompiuterine programa „Seakeeper“. Skaičiavimų modelis karinis laivas DTMB 5415 tranciniu laivagaliu, gumbo formos laivapriekiu (1priedas).

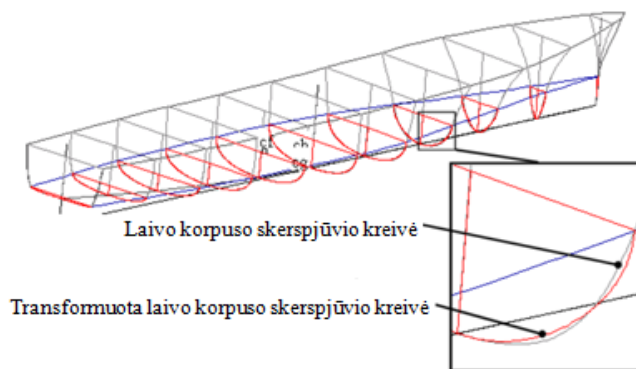
Norint apskaičiuoti laivo supimąsi reikia nustatyti bangavimo parametrus. Skaičiuosime nurodyto laivo supimąsi reguliariose bangose, priimant sąlyga, kad laivas yra fiksuotoje padėtyje.

Skaičiavimai hidrodinaminės teorijos pagrindu paremta programa „Seakeeper“ atliekami šia tvarka (Formation Design Systems, 2009):

- 1) Įkeliamas laivo brėžinys;
- 2) Korpuso transformavimas pagal Lewis transformavimo funkciją;
- 3) Grimzlės nustatymas;
- 4) Vertikalaus svorio centro nustatymas;
- 5) Dempferavimo koeficiento nustatymas (bortiniam supimuisi);
- 6) Inercijos spindulių įvedimas;
- 7) Laive nurodomos vietos, kuriose bus matuojamas supimosi intensyvumas;
- 8) Bangavimo parametrų nustatymas;
- 9) Skaičiavimų rezultatų apdorojimas.

Laivo modelis į „Seakeeper“ programą įkeliamas atlikus šias komandas: *File / open design*.

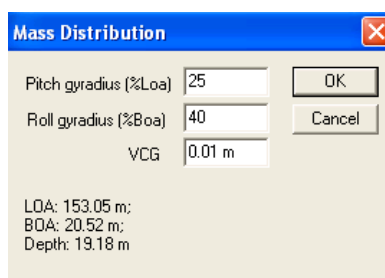
Iš *analysis* įrankių juostos pasirenkama *Measure hull* komandą. Panaudojus *Measure Hull* komandą laivo skerspjūviai yra transformuojami pagal Lewis funkciją. *Measure Hull* lange nurodome skerspjūvių skaičių 21 ir funkcijos parametrų skaičių 4 (13 pav). Skerspjūvių transformavimas atliekamas tam, kad būtų gauta skerspjūvio kontūrą aprašanti funkcija, kuri vėliau naudojama greičio potencialo funkcijos sudarymui.



13 pav. Laivo skerspjūvio transformavimas

*Analysis / vessel type* nurodome vienatūrį laivo korpuso tipą – *monohull*.

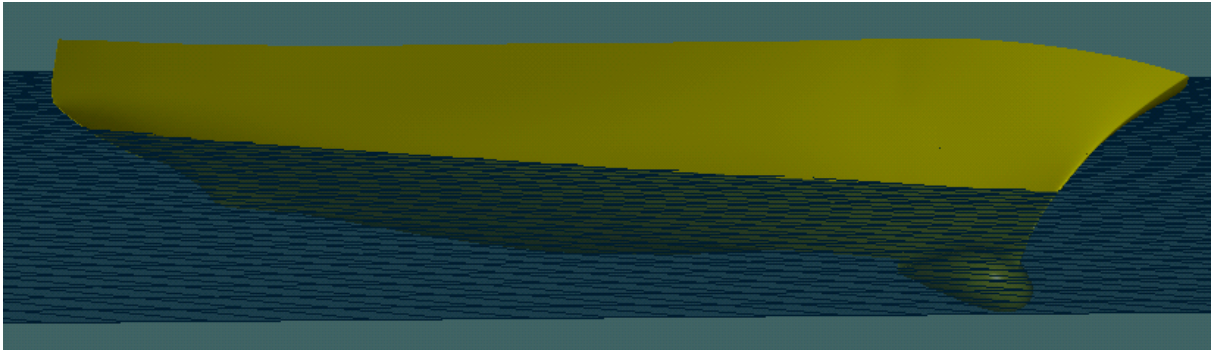
*Analysis / mass distribution* lange nurodome supimosi inercijos spindulius apskaičiuojamus kaip procentinis dydis nuo laivo ilgio ir pločio. Vertikalią svorio centro padėtį įvedame 6.28 m virš grindinės linijos (žr. 14 pav).



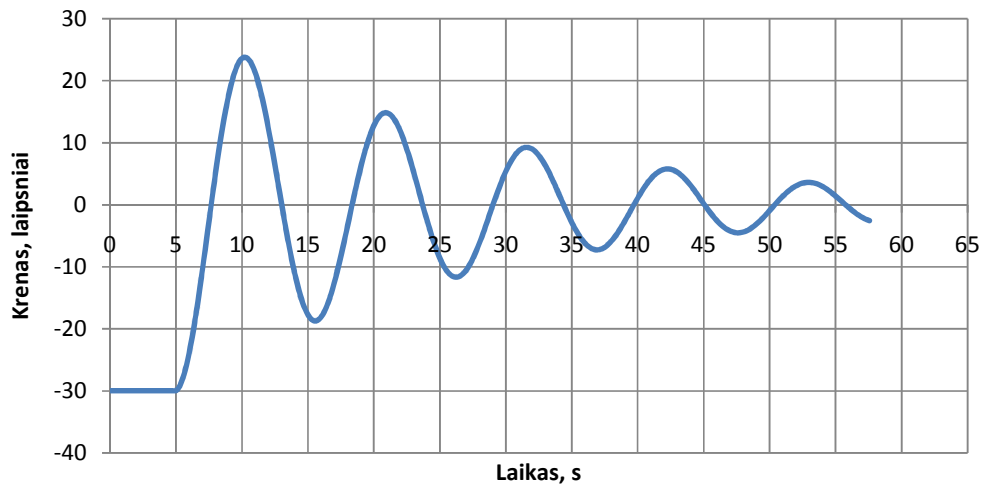
14 pav. Svorio centro ir masės inercijos spindulių nustatymas

„Seakeeper“ programoje bortinio supimosi dempferavimas nėra modeliuojamas, todėl bedimensio dempferavimo koeficiento skaitinė vertė yra užduodama programoje kaip pradiniai duomenys.

Tipinės dempferavimo koeficiento reikšmės daugeliui laivų yra nuo 0.05 iki 0.1. Lewis nurodo dempferavimo koeficiento reikšmę 0.05, kurią galima priimti tipiniams laivams. Programoje taip pat yra galimybė apskaičiuoti bortinio supimosi svyravimų kreivę ramiam vandenyje (15 pav.), kuri gali padėti pasirinkti tinkamą dempferavimo koeficiento skaitinę vertę. *Analysis / damping factors* lange nustatome bedimensį dempferavimo koeficientą 0.075. Patikriname laivo svyravimus ramiam vandenyje atlikdami supimosi simuliaciją ir apskaičiuodami slopstančių svyravimų kreivę (16 pav.).



15 pav. Laivo svyravimai ramiame vandenyje



16 pav. Slopstančių svyravimų kreivė

Apskaičiuojame savųjų slopstančių svyravimų kreivę (16 pav.), laivo savųjų svyravimų periodas  $T=10,7s$ . Apskaičiuojame savųjų svyravimų dažnį:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{10,7} = 0,093 \text{ Hz}$$

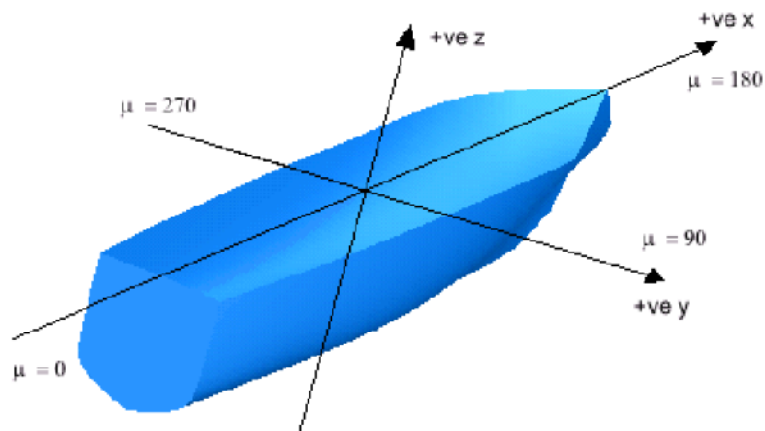
$$n = 2\pi F = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,093 = 0,587 \text{ rad/s}$$

(33)

čia  $F$  – laivo nuosavųjų svyravimų dažnis, Hz;

$n$  – laivo nuosavųjų svyravimų apskritiminis dažnis,  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

*Inputs* lange nustatome bangų kryptis laivo atžvilgiu. Nustatome bangų kryptį 90 ir 180 laipsnių (žr. 17 pav.).



17 pav. Bangų kryptys

„Seakeeper“ programa laivo supimosi intensyvumo nevertinsime, todėl vietų supimosi intensyvumui matuoti nurodome. Bangavimo parametrus nustatome *Analysis* įrankių juostoje pasirinkus *calculate wave surface* komandą. Parenkame *regular wave surface* ir nurodome bangos apskritiminį dažnį ir amplitudę. Šie dydžiai užduodami pagal sudarytus reguliarių bangų parametrus atsižvelgiant į atlikto supimosi eksperimento bangų parametrus (4 ir 5 lentelės).

4 lentelė. Reguliarių bangų parametrai

Bangos periodas, s	6	7	8	9	9.5	10	10.5	11
Bangos aukštis, m	1.12	1.53	2.00	2.53	2.82	3.12	3.44	3.78
Bangos ilgis, m	56.20	76.49	99.91	126.45	140.89	156.11	172.11	188.90
Bangos amplitudė, m	0.56	0.76	1.00	1.26	1.41	1.56	1.72	1.89
Bangos dažnis, rad/s	1.047	0.898	0.785	0.698	0.661	0.628	0.598	0.571
H/λ	0.02							

5 lentelė. Reguliarių bangų parametrai

Bangos periodas, s	12	13	14	15	16	20	17.25	18.5
Bangos aukštis, m	4.50	5.28	6.12	7.03	7.99	12.49	9.29	10.69
Bangos ilgis, m	224.	263.8	305.9	351.25	399.65	624.45	464.53	534.29
Bangos amplitudė, m	2.25	2.64	3.06	3.52	4.00	6.25	4.65	5.35
Bangos dažnis, rad/s	0.52	1.215	1.047	0.912	0.802	0.513	0.690	0.600
H/λ	0.02							

Skaičiavimų rezultatus gautus „Seakeeper“ programa pateikiame lentelių forma. (6, 7, 8, 9 lentelės)

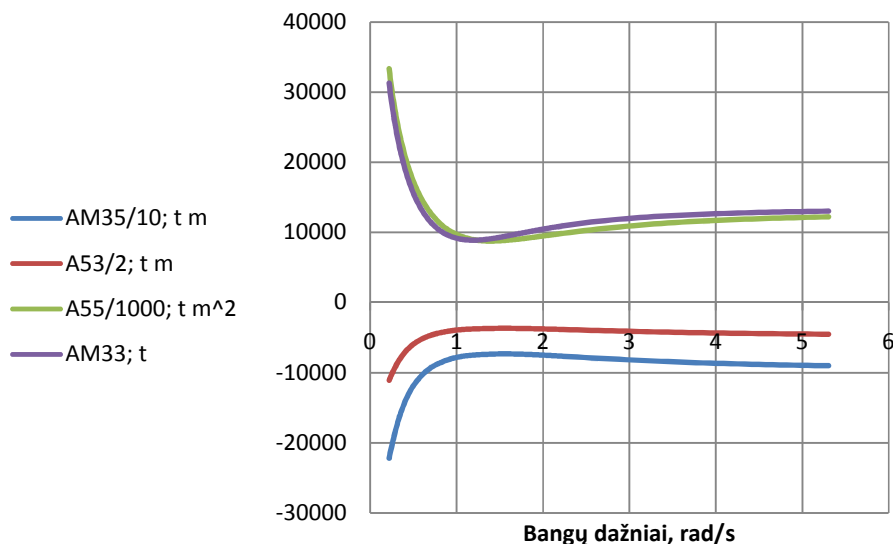
6 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, bangų kryptis 90 laipsnių

1	Bangos Periodas, s	6	7	8	9	10	11	12
2	Bangos aukštis, m	1.12	1.53	2.00	2.53	3.12	3.78	4.50
3	Bangos ilgis, m	56.20	76.49	99.91	126.45	156.11	188.90	224.80
4	Bangos amplitudė, m	0.56	0.76	1.00	1.26	1.56	1.89	2.25
5	Bangos dažnis, Rad/s	1.047	0.898	0.785	0.698	0.628	0.571	0.524
6	vertikalus supimasis, m	0.738	1.103	1.362	1.620	1.860	2.150	2.460
7	Krenas sk, laipsniai	1.660	2.720	4.580	8.090	17.940	23.000	13.900
8	RAO $\theta$	0.461	0.756	1.272	2.247	4.983	6.389	3.861
9	RAOZ	1.313	1.442	1.363	1.281	1.191	1.138	1.094

7 lentelė. Skaičiavimų rezultatai, bangų kryptis 90 laipsnių

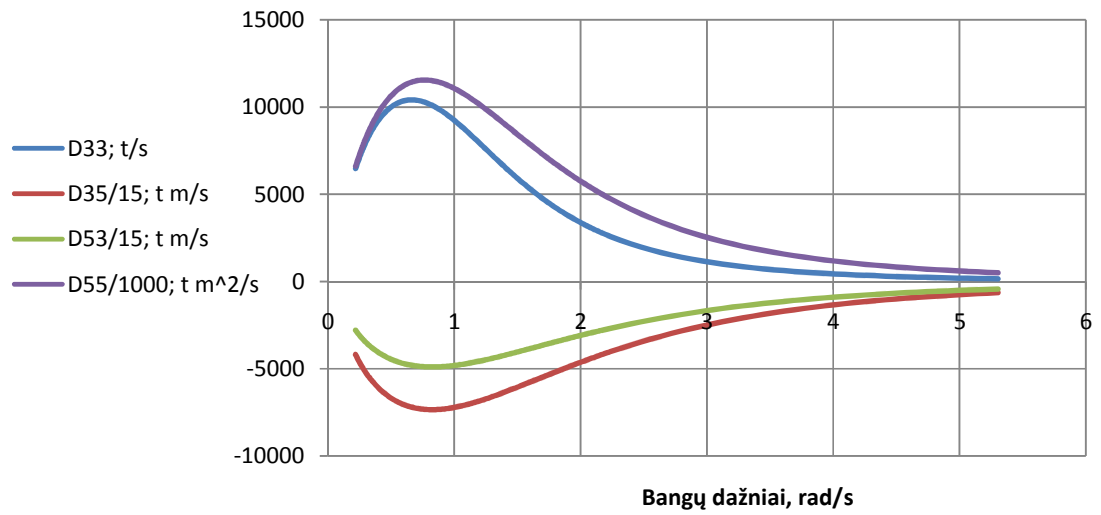
1	Bangos Periodas, s	13	15	16	20	9.5	10.5	17.25	18.5
2	Bangos aukštis, m	5.28	7.03	7.99	12.49	2.82	3.44	9.29	10.69
3	Bangos ilgis, m	263.83	351.25	399.65	624.45	140.89	172.11	464.53	534.29
4	Bangos amplitudė, m	2.64	3.51	4.00	6.24	1.41	1.72	4.65	5.34
5	Bangos dažnis, rad/s	0.483	0.419	0.393	0.314	0.661	0.598	0.364	0.340
6	vertikalus supimasis sk,	2.810	3.610	4.060	6.210	1.740	2.000	4.680	5.340
7	Krenas sk, laipsniai	10.170	7.060	6.360	4.980	11.640	23.270	5.890	5.710
8	RAO $\theta$	2.825	1.961	1.767	1.383	3.233	6.464	1.636	1.586
9	RAOZ	1.065	1.028	1.016	0.994	1.235	1.162	1.007	0.999

Hidrodinaminės vandens masės, papildomos inercijos ir dempferavimo koeficientai apskaičiuoti kiliniam – vertikaliajam supimuisi „Seakeeper“ programa pateikiami grafiškai priklausomai nuo bangų dažnio (18 ir 19 pav.).



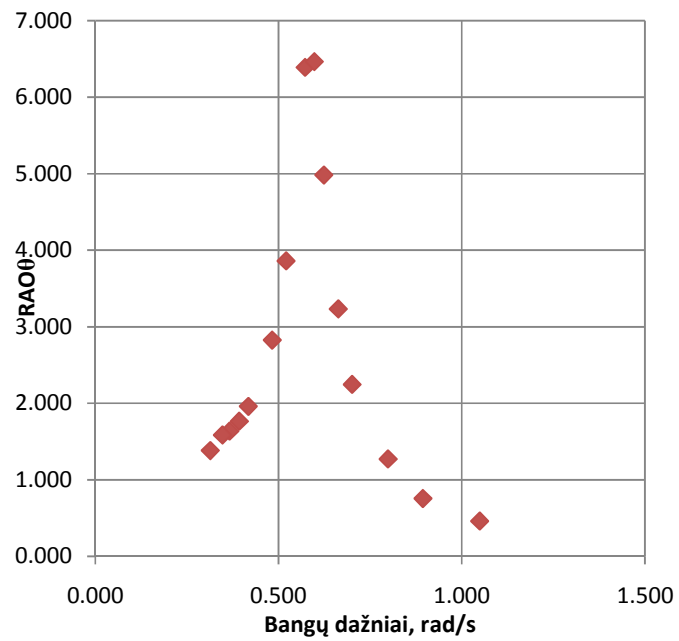
18 pav. Hidrodinaminė vandens masė ir papildoma inercija

AM-hidrodinaminė vandens masė, A-papildoma inercija

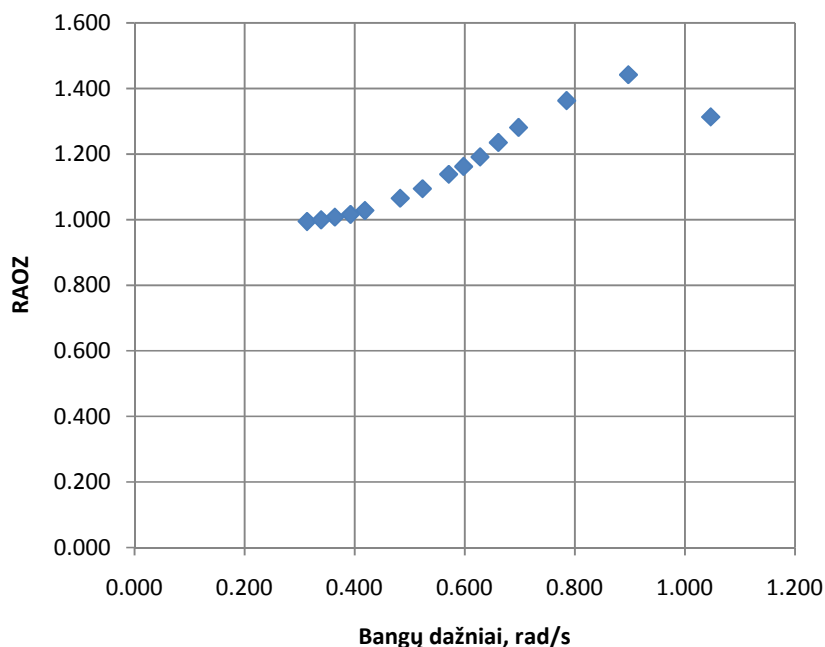


19 pav. Dempferavimo koeficientai

Pagal skaičiavimų rezultatų duomenis (5 ir 6 lentelės) nubraižome bortinio ir vertikalaus supimosi dažninę charakteristiką kai bangų kryptis 90 laipsnių (20, 21 pav.).



20 pav. Bortinio supimosi dažninė charakteristika



21 pav. Vertikalus supimosi dažninė charakteristika

Apskaičiavus dinamiškumo koeficientus bangų kryptiai esant 90 laipsnių ir grafiškai juos pavaizdavus priklausomai nuo bangų dažnio, bortinio supimosi atveju didžiausias supimosi intensyvumas yra ties 0.6 rad/s bangos dažniu, kuris labai artimas laivo savųjų svyravimų dažniui 0.587 rad/s. Vertikalus supimosi atveju rezonansas pastebimas ties bangos dažniu 0.898 rad/s. Absoliutūs supimosi skaičiavimų dydžiai pateikti 6 ir 7 lentelėje.

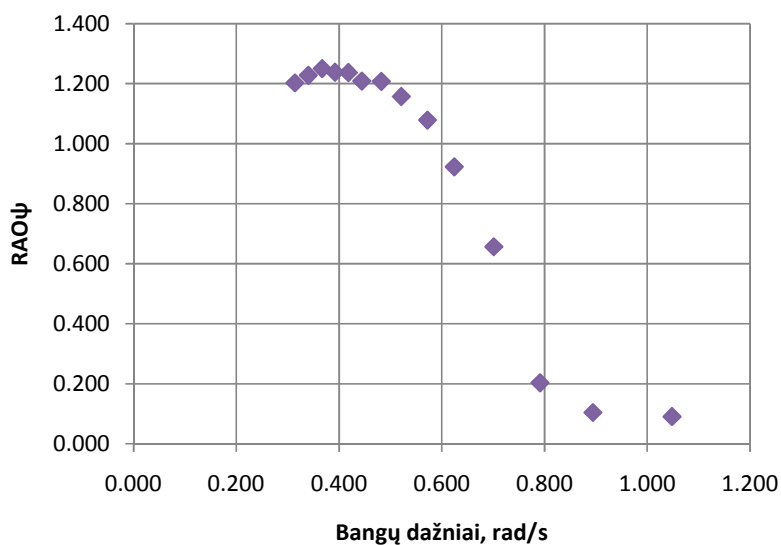
Supimosi dažninę charakteristiką bangų kryptiai 180 laipsnių braižome pagal 8 ir 9 lentelės duomenis. Dažninė charakteristika kilinio ir vertikalus supimosi atveju pateikiama grafiškai (22, 23 pav.).

8 lentelė. Supimosi skaičiavimų rezultatai - bangų kryptis 180 laipsnių

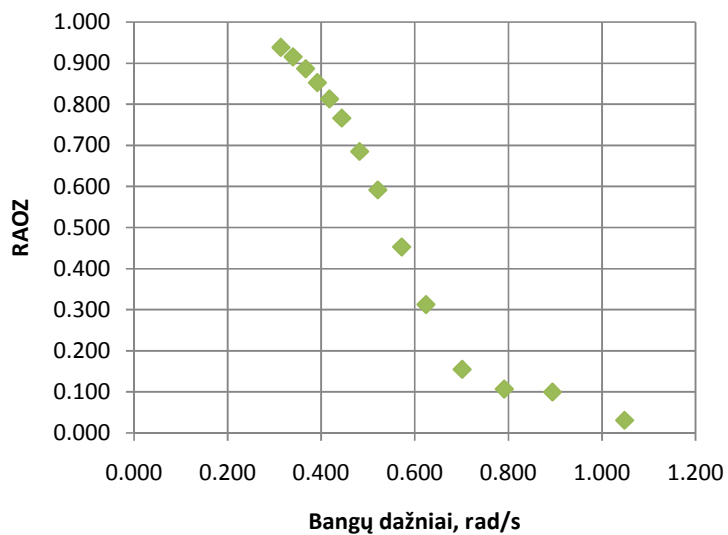
1	Bangos Periodas (s)	6	7	8	9	10	11	12
2	Bangos aukštis (m)	1.12	1.53	2.00	2.53	3.12	3.78	4.50
3	Bangos ilgis, m	56.20	76.49	99.91	126.45	156.11	188.90	224.80
4	Bangos amplitudė, m	0.56	0.76	1.00	1.26	1.56	1.89	2.25
5	bangos dažnis, rad/s	1.047	0.898	0.785	0.698	0.628	0.571	0.524
6	bangos dažnis sk, rad/s	1.048	0.894	0.791	0.701	0.624	0.572	0.521
7	vertikalus supimasis, m	0.017	0.076	0.107	0.196	0.488	0.856	1.330
8	diferentas, laipsn	0.325	0.374	0.729	2.363	3.321	3.883	4.166
9	RAO $\psi$	0.090	0.104	0.203	0.656	0.923	1.079	1.157
10	RAOZ	0.031	0.100	0.107	0.155	0.313	0.453	0.592

9 lentelė. Supimosi skaičiavimų rezultatai - bangų kryptis 180 laipsnių

1	Bangos Periodas (s)	13	14	15	16	17.25	18.5	20
2	Bangos aukštis (m)	5.28	6.12	7.03	7.99	9.29	10.69	12.49
3	Bangos ilgis, m	263.83	305.98	351.25	399.65	464.53	534.29	624.45
4	Bangos amplitudė, m	2.64	3.06	3.51	4.00	4.65	5.34	6.24
5	bangos dažnis, rad/s	0.483	0.449	0.419	0.393	0.364	0.340	0.314
6	bangos dažnis sk, rad/s	0.482	0.444	0.418	0.392	0.367	0.340	0.314
7	vertikalus supimasis, m	1.808	2.345	2.856	3.408	4.118	4.890	5.860
8	diferentas, laipsn	4.347	4.351	4.453	4.457	4.500	4.420	4.329
9	RAO $\psi$	1.207	1.209	1.237	1.238	1.250	1.228	1.203
10	RAOZ	0.685	0.766	0.813	0.853	0.886	0.915	0.938



22 pav. Kilinio supimosi intensyvumo dažninė charakteristika



23 pav. Vertikalaus supimosi intensyvumo dažninė charakteristika

Apskaičiavus supimosi dinamiškumo koeficientus bangų kryptčiai esant į laivapriekį ir grafiškai juos pavaizdavus priklausomai nuo bangų dažnio, kilinio supimosi atveju didžiausias supimosi intensyvumas yra ties 0.393 rad/s bangos dažniu. Vertikalaus supimosi atveju supimosi intensyvumo didėja mažėjant bangų dažniams. Absoliutūs supimosi skaičiavimų dydžiai pateikti 8 ir 9 lentelėje.

#### **Išvados:**

Bortinio supimosi atveju bangų kryptčiai esant 90 laipsnių laivui pavojingiausios bangos, kurių aukštis lygus 3.44m, bangų ilgis 172 m ir dažnis 0.598 rad/s. Esant tokiam bangavimui laivas pasveriamas maksimaliu 23 laipsnių kampu.

Kilinio supimosi atveju bangų kryptčiai esant į laivapriekį diferento kampo maksimumas  $\psi=4,42$  laipsniai pasiekiamas esant bangų aukščiui 10.7 m, bangų ilgis 534.3 m ir dažnis 0.34 rad/s.

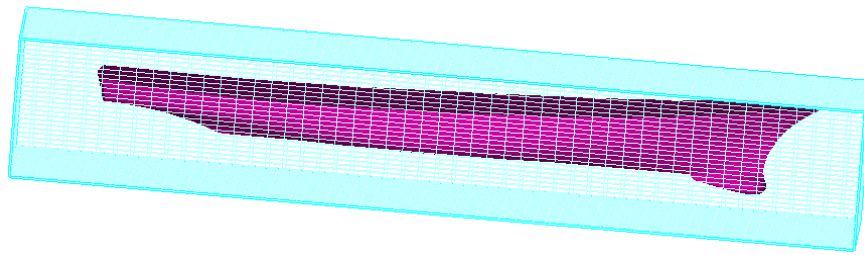
### **2.3 Laivo supimosi skaičiavimas CFD metodu**

„FLOW – 3D“ programai reikalingi pradiniai duomenys: Laivo korpuso geometrija, tiriamojo objekto masė ir inercijos momentai. Supimosi skaičiavimai atliekami įvykdžius šias komandas:

- 1) Add new simulation;
- 2) Model setup / Gravity;
- 3) Model setup / Moving and simple deforming objects;
- 4) Model setup / viscosity and turbulence;
- 5) Materials / Fluid database;
- 6) Model setup / Output;
- 7) Model setup / General;
- 8) Model setup / Meshing and geometry;
- 9) Simulate / run simulation.

*Add new simulation* sukuriama direktorija skaičiavimų duomenų saugojimui. *Model setup / Gravity* nustatome laisvojo kritimo pagreitį atsižvelgiant į programoje naudojamas koordinačių ašies kryptis – nustatome (-9,81). *Model setup / Moving and simple deforming objects* aktyvuojame, aktyvavus tiriamasis objektas laikomas kaip judantis kūnas. *Model setup/ viscosity and turbulence* aktyvuojame skysčio klampumą. *Materials / Fluid database* iš duomenų bazės nurodome skystį, kuris bus naudojamas supimosi skaičiavimuose, parenkame gėlą vandenį kurio temperatūra 15.3 laipsniai. *Model setup/ Output* pažymime reikalingus dydžius kurie bus apskaičiuoti ir galimi jų rezultatai atlikus skaičiavimus. *Model setup / General* nurodome skaičiavimų laiką.

*Model setup / Meshing and geometry* įkeliame laivo geometrijos failą panaudojus *import geometry* komandą. *Mesh – Cartesian* juostoje *add mesh* komanda įkeliame skaičiavimų tinklą (24 pav).



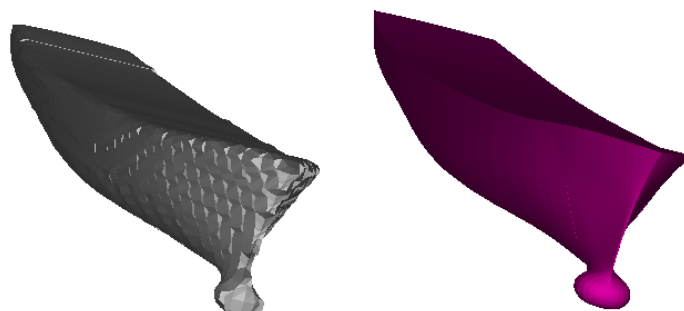
24 pav. Skaičiavimų tinklas

Šiuo tinklu yra apibrėžiamas skaičiavimų masyvas. Tinklas yra sudalinamas į tam tikrą skaičių elementų, šie elementai gaunami nurodant tam tikrą skaičių pjūvių išilgai koordinatinių ašių. Kuo tankesnis tinklas tuo elementų tūriai yra mažesni ir tuo geriau yra atvaizduojama korpuso geometrija, tačiau esant didesniam skaičiui elementų padidėja skaičiavimų laikas. Visu pirmą nurodome tinklo ribas ir sudaliname į nurodytą skerspjūvių skaičių 25 pav. Tinklo parametrus pasirenkame atsižvelgiant į kompiuterio techninius parametrus.

Mesh - Cartesian	
Mesh block 1	
Name	
Size of Cells	
Total Cells	1000
X direction	
Total Cells	50
Mesh Plane 1	-20
Mesh Plane 2	160
Y direction	
Total Cells	30
Mesh Plane 1	-15
Mesh Plane 2	15
Z direction	
Total Cells	30
Mesh Plane 1	-10
Mesh Plane 2	20

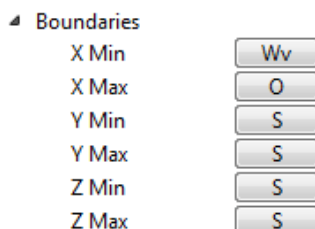
25 pav. Skaičiavimų tinklo parametrai

Korpuso forma pritaikius skaičiavimų tinklą galima peržiūrėti paspaudus *Favor / render* komandą 26 pav.



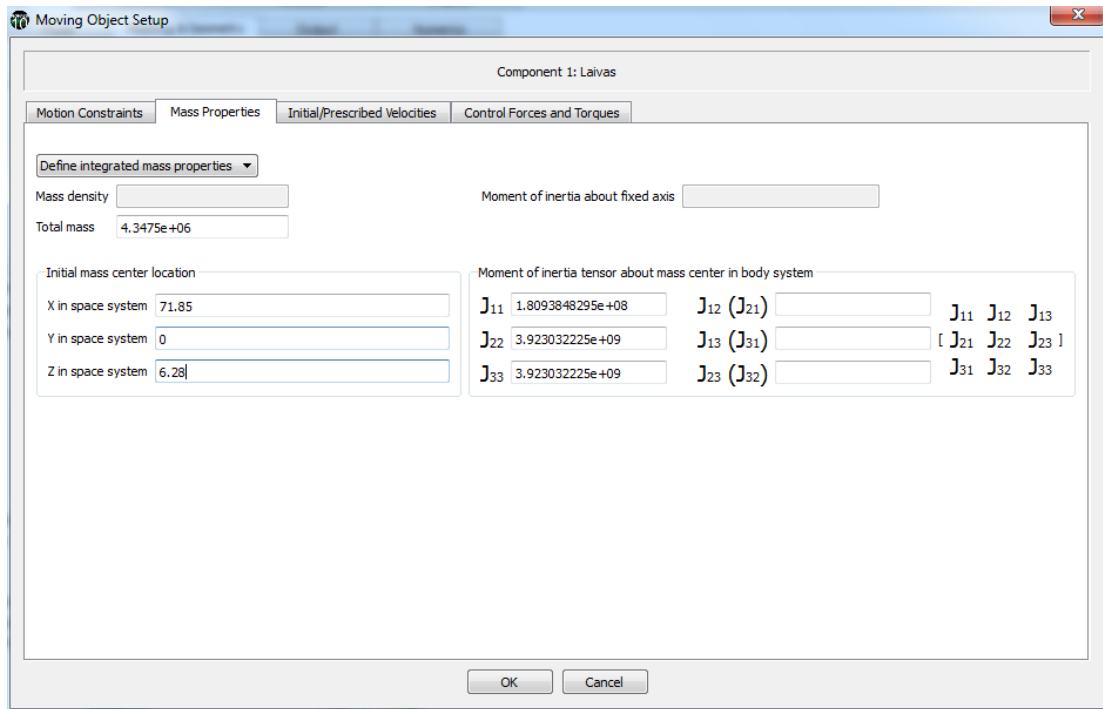
## 26 pav. Tinklelio tankumo įtaka geometrijos kokybei

Jau minėjome, kad korpuso geometrijos kokybei turi įtakos tinklelio tankumas, šiuo atveju laikome, kad gauta korpuso forma įkėlus skaičiavimų tinklę yra priimtinos kokybės. Kitas žingsnis būtų nustatyti skaičiavimo pradinės sąlygas. Šie nustatymai atliekami *Boundary* juostoje. Skaičiavimų masyvą riboja keturios sienelės, todėl kiekvienai sieniei reikia nustatyti pradinės sąlygas (27 pav.).



27 pav. Skaičiavimo masyvo pradinės sąlygos

Skaičiavimų masyve reikalinga nurodyti reguliarias bangas, prie *Xmin* sienelės nurodome reguliarios bangos periodą ir amplitudę bei vandens lygį. Vandens lygis yra lygus grimzlei ir *fluid elevation* laukelyje įvedamas 6.27 m. Skaičiavimas atlikti generuosime linijines reguliarias bangas, pasirenkame *linear / definition*, bangų parametrai įvedami iš 4, 5 lentelės duomenų. Įvedus bangos parametrus *Initial / Global/ pressure* laukelyje nurodome slėgį – *hydrostatic pressure in z direction*. *Fluid Initialization / fluid elevation* nurodome laivo grimzlę 6.27 m. Atlikus šiuos nustatymus *Component / Component 1:5415 / component properties/ Type of moving object* pasirenkame sudėtinį objekto judėjimą – *coupled motion*. *Moving object properties / edit / Moving object setup / Motion constraints* nurodome šešių laisvės laisvnių judėjimą ir suvaržome judėjimą, kurio nenagrinėjame ties judėjimo tipu pasirinkus *prescribed*. Laivo supimasį skaičiuosime bangoms plintant 90 laipsnių kryptimi ir 180 laipsnių kryptimi. Kilinio supimosi ir kartu vykstančio vertikalaus supimosi atveju paliekami nesuvaržytus judesius aplink y ašį ir vertikalus judėjimą z ašies kryptimi. *Mass properties* lange reikia nurodyti tiriamoje objekte masės centro koordinatas ir inercijos momentus. Įvedame šiuos duomenis kaip pavaizduota 28 pav.



28 pav. Laivo masė ir inercijos momentai

Laivo masė ir svorio centro koordinatės įvedamos pagal laivo korpuso duomenis nurodytus 2 priede. Laivo masės inercijos momentai apie x, y, z bendru atveju surandami:

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \int (y^2 + z^2) dm, \\
 J_{22} &= \int (x^2 + z^2) dm, \\
 J_{33} &= \int (y^2 + x^2) dm,
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

čia  $J_{11}$  – masės inercijos momentas apie x ašį;  
 $J_{22}$  – masės inercijos momentas apie y ašį;  
 $J_{33}$  – masės inercijos momentas apie z ašį;  
y, z, x – elementarios masės koordinatės.

Laivo masės inercijos momentas įvertinus hidrodinaminę vandens masę yra susietas tokia priklausomybe (Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н., 1976):

$$J_i + \lambda_{k i} = MR_x^2,
 \tag{35}$$

čia  $J_i$  – Laivo korpuso masės inercijos momentas;  
 $\lambda_{k i}$  – hidrodinaminė vandens masė;  
M – laivo masė;  
 $R_i$  – laivo inercijos spindulys.

Laivo masės inercijos spinduliai kinta šiose ribose (Journée, et al., 2003, 39 p.):

$$R_x = 0.3B - 0.4B,$$

$$\begin{aligned}
 R_{y_i} &= 0.22L - 0.28L, \\
 R_{z_i} &= 0.22L - 0.28L,
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

čia B – laivo plotis;  
L-laivo ilgis.

Hidrodinaminė vandens masės inercijos momento dydis sudaro apie 30% laivo korpuso inercijos, tuomet sudarome lygtį pagal kurią apskaičiuosime inercijos momentus apie x, y, z ašis.

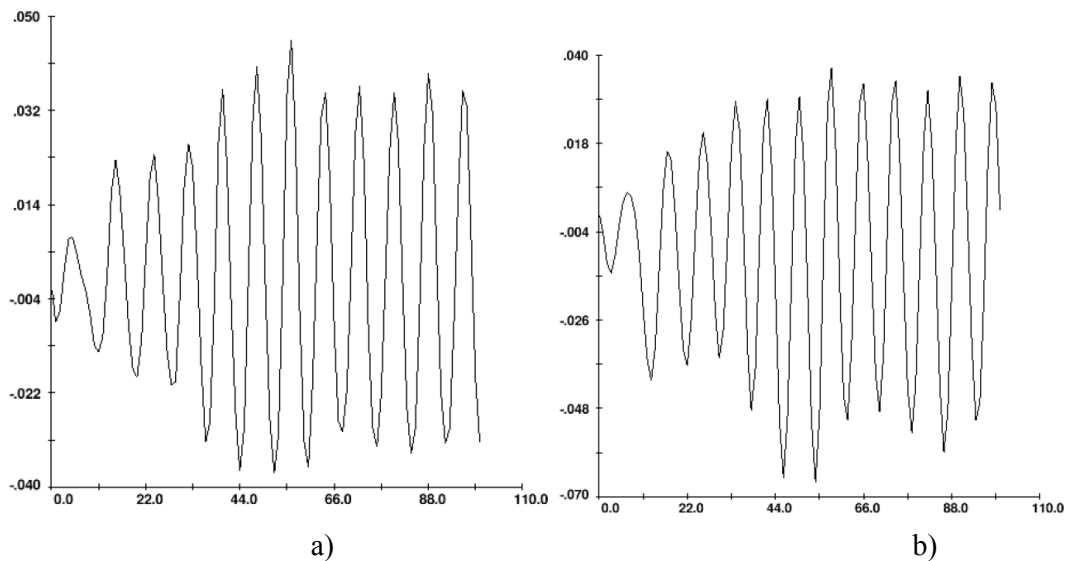
$$\begin{aligned}
 J_{1_i} &= \frac{M(0.3B)^2}{1.3} = \frac{8895000(0.4 \cdot 19.06)^2}{1.3} = 3.618 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\
 J_{2_i} &= \frac{M(0.22L)^2}{1.3} = \frac{8895000(0.22 \cdot 142)^2}{1.3} = 7.846 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\
 J_{3_i} &= \frac{M(0.22L)^2}{1.3} = \frac{8895000(0.22 \cdot 142)^2}{1.3} = 7.846 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

čia  $J_i$  – Laivo korpuso masės inercijos momentas;  
 $R_i$  – laivo inercijos spindulys.

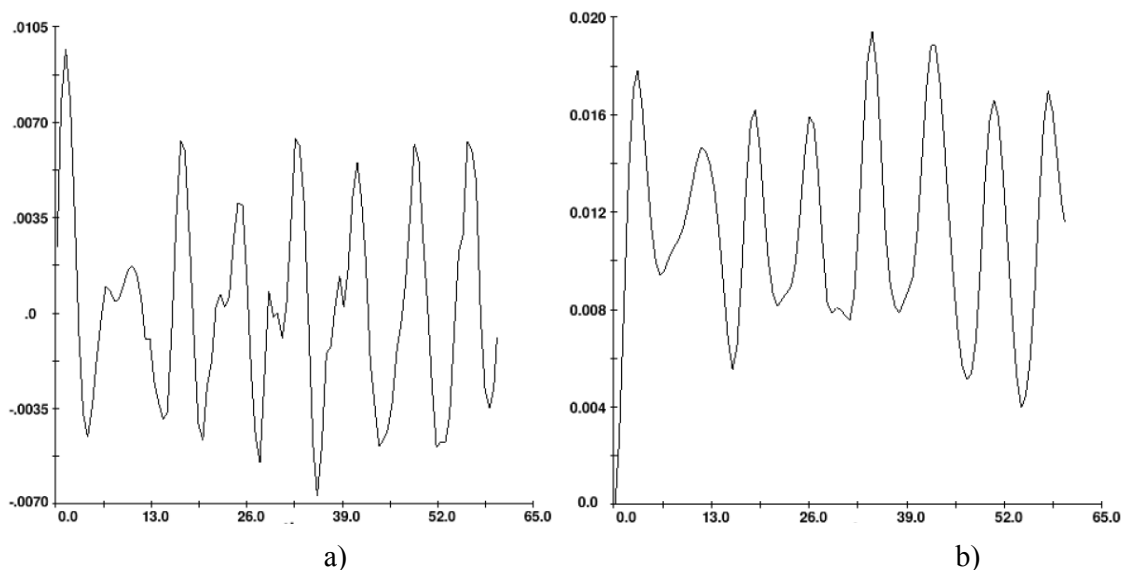
Jeigu skaičiavimus atliekame sudarydami tinklą nuo vieno borto iki diametralinės plokštumos, tuomet laivo masė ir inercijos momentai įvedami dvigubai mažesni negu paskaičiuoti visam laivui.

Atlikus šiuos nustatymus aktyvuojame *simulate* komandą. Rezultatų peržiūra atliekame *Analyze / Probe / General data history*.

Apskaičiuosime laivo kilinį, bortinį supimąsi reguliariose bangose, kurių aukštis 2 m ir periodas 8s. Skaičiavimų rezultatus pateikiame grafiškai horizontaliojoje ašyje žymimas laikas, vertikaliojoje ašyje svyravimų greitis arba svyravimų amplitudė.



29 pav. a) Kampinio greičio (rad/s) priklausomybė nuo laiko (s), b) Diferanto kampo (rad) priklausomybė nuo laiko (s)



30 pav. a) bortinio supimosi kampinis greitis (rad/s) priklausomai nuo laiko, b) Kreno kampas (rad) priklausomai nuo laiko (s)

Iš grafiko vaizduojančio diferento priklausomybę nuo laiko (29 pav.) vidutine kilinio supimosi amplitudė yra 0.033 rad arba 1.89 laipsnio esant 2 m aukščio reguliarioms bangoms, kurių periodas 8 s.

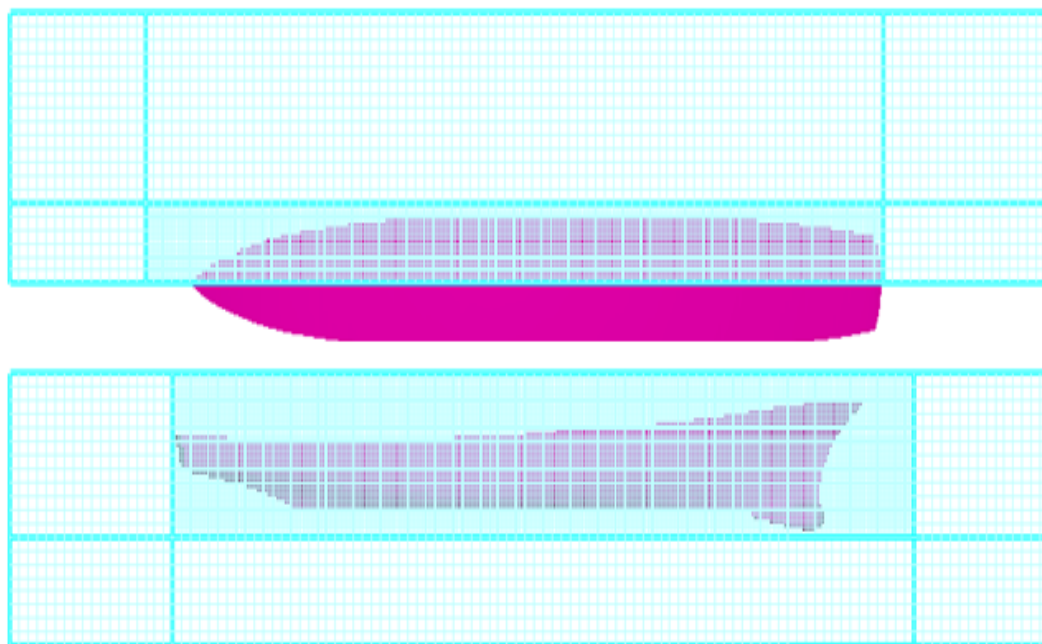
Iš grafiko vaizduojančio kreno priklausomybę nuo laiko (30 pav.) vidutinė bortinio supimosi amplitudė yra 0.008 rad arba 0.5 laipsnio esant 2 m aukščio reguliarioms bangoms, kurių periodas 8 s.

Gauti skaičiavimų rezultatai palyginus su eksperimento duomenimis skiriasi žymiai, bortinio supimosi amplitudė gauta 7.74 karto mažesnė, kilinio supimosi amplitudė gauta 4.5 karto didesnė. Pakartosime skaičiavimus dar kartą, tik skaičiavimų tinklą sudarysime tankesnę panaudodami mažesnę elementų dydį bei pagalbines plokštumas. Skaičiavimų tinklą sudarysime iš dviejų tinklų, jų parametrus nustatome kaip pavaizduota 31 pav.

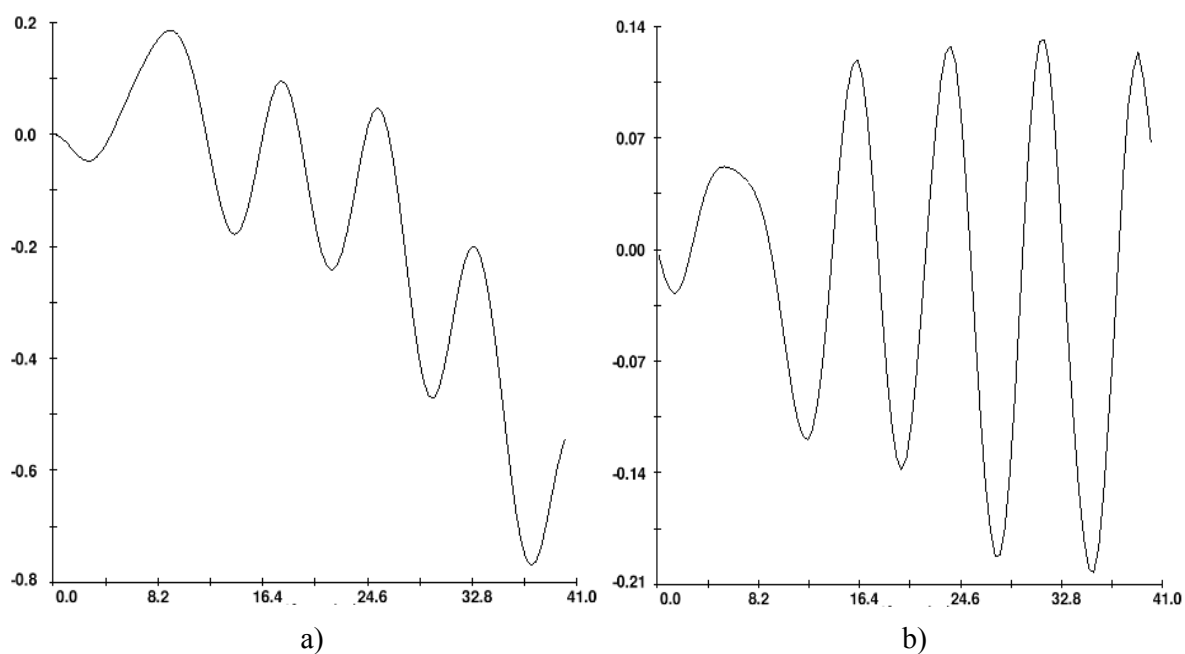
Mesh block 2		mesh block 1	
Name		Name	
Size of Cells	0.6	Size of Cells	2
Total Cells		Total Cells	
X direction		X direction	
Total Cells		Total Cells	
Mesh Plane 1	-20	Mesh Plane 1	-50
Mesh Plane 2	144	Mesh Plane 2	-20
Y direction		Y direction	
Total Cells		Total Cells	
Mesh Plane 1	0	Mesh Plane 1	0
Mesh Plane 2	12	Mesh Plane 2	12
Z direction		Z direction	
Total Cells		Total Cells	
Mesh Plane 1	-4	Mesh Plane 1	-20
Mesh Plane 2	20	Mesh Plane 2	-4
		Mesh Plane 3	20

31 pav. Skaičiavimų tinklų parametrai

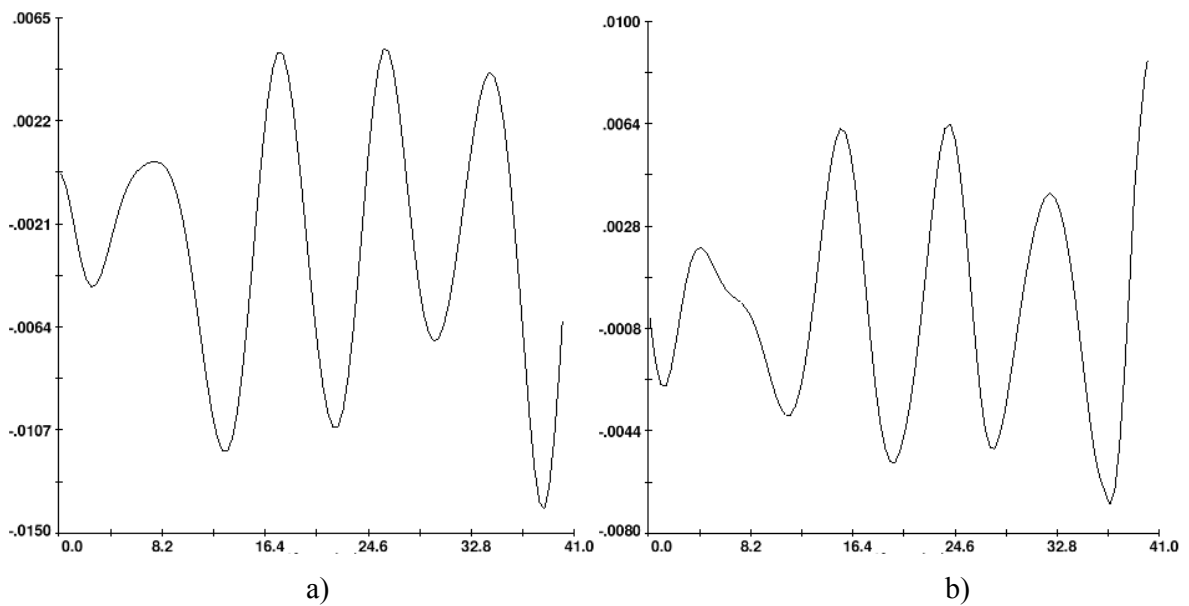
Pakartojame skaičiavimus su naujuoju skaičiavimų tinklu (32 pav.) gautus rezultatus pateikiame grafiškai.



32 pav. Pakoreguotas skaičiavimų tinklas



33 pav. a) Vertikalus poslinkis (m) priklausomai nuo laiko (s), b) vertikalus supimosi greitis (m/s) priklausomai nuo laiko (s)



34 pav. a) Kilinio supimosi diferento kampas (rad) priklausomai nuo laiko (s), b) Kilinio supimosi kampinis greitis priklausomai nuo laiko (s)

Apskaičiavus vertikalųjį laivo supimąsi gauta vertikalios supimosi amplitudė 0.2 m (33 pav.). Pagal eksperimento duomenis esant 2 m aukščio ir 8 s periodo bangoms vertikalios supimosi amplitudė gauta 0.181 m. Eksperimento ir „FLOW-3D“ programa apskaičiuotas vertikalūs laivo supimosi santykis 0.9, gauti rezultatai skiriasi apie 10%.

Apskaičiavus kilinį supimąsi gauta kilinio supimosi amplitudė 0.40 laipsnio (34 pav.). Pagal eksperimento duomenis kilinio supimosi amplitudė gauta 0.42 laipsnio, eksperimento ir „FLOW-3D“ programa gautų rezultatų santykis 1.05, gauti rezultatai skiriasi apie 5%.

**Išvada:** Pakoregavus skaičiavimų tinklą skaičiavimų rezultatų skirtumas sumažėjo, sudarytas skaičiavimų tinklas panaudojant du tinklus su kirtimo plokštumomis tinkamas skaičiuoti laivo supimąsi reguliariose bangose, gautų rezultatų skirtumas vertikalios supimosi atveju gautas 10% ir kilinio supimosi 5%. Bortiniam supimuisi neatliksime skaičiavimų, nes iš gautų kilinio ir vertikalios supimosi skaičiavimų pagrindai galima teigti jog skaičiavimo tinklo parametrai turi nemaža įtaką skaičiavimų kokybei, o norint pasiekti gerus skaičiavimų rezultatus CFD metodu reikia sudaryti kuo tankesnį skaičiavimų tinklą ir teisingai užduoti jo parametrus.

Detalesni skaičiavimų rezultatai kilinio ir vertikalios supimosi atveju pateikiami 3 priede. Šiame priede pateikiami skaičiavimų rezultatai grafiškai, taip pat yra galimybė peržiūrėti skaičiavimus video tipo peržiūra. Skaičiavimų video medžiaga pateikiama kompaktiniame diske.

## 2.4 Eksperimento planas

Eksperimento tikslas – išmatuoti laivo kampinius ir linijinius supimosi dydžius reguliariose bangose.

Tyrimo objektas – Karinis laivas DTMB 5415 bulbo formos laivapriekiu, tranciniu laivagaliu, španhautų forma U tipo išskyrus laivapriekio dalį V formos.

### **Reguliarious bangos**

Daugeliui laivų optimalus skaičius eksperimentų turi būti atliktas kiekvienam bandomo laivo greičiui, nuo 0.5L iki 2.0L bangų ilgių intervale. Didesnis eksperimentų skaičius su smulkesniu bangų ilgių intervalu užtikrina tikslesnę rezonanso zonos aptikimą. Santykis generuojamų bangų aukščio su bangų ilgiu turi išlikti pastovus. Rekomenduojamas bangos aukščio ir ilgio santykis yra apie 1/50.

Atliekant supimosi bandymą turi būti įvertinta (ITTC<sup>1</sup>, 7.5-02-07-02):

Modelio matmenys;

Bandymo baseino matmenys;

Bangų derinimas;

Eksperimento trukmė;

Matavimų įranga;

Suvaržymo metodas (modeliui);

Bangų periodai ir dažniai;

Greitis ir kryptis;

Bangografo vieta;

Pakartotinių eksperimentų skaičius;

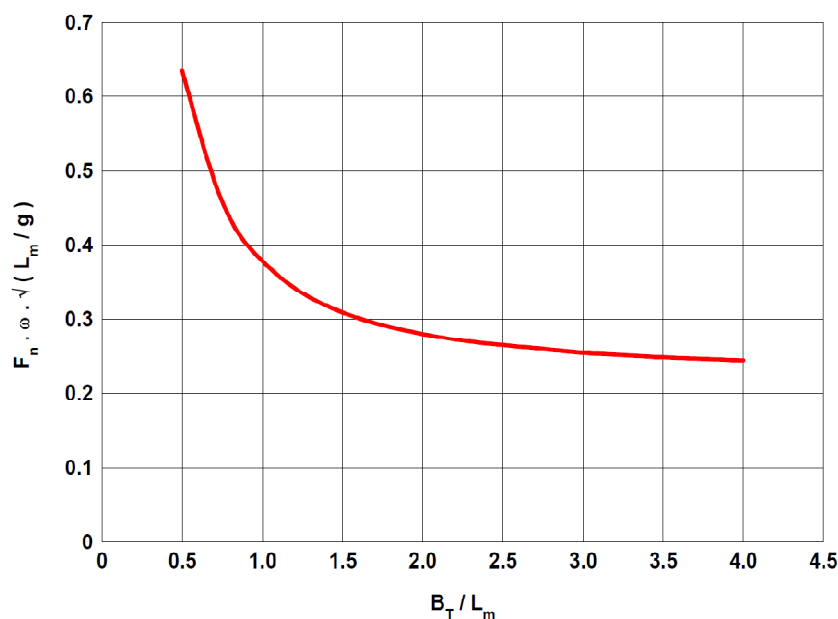
Tikslumas skirtingų prietaisų.

### **Modelio matmenys**

Modelio dydis turėtų būti kuo didesnis, atsižvelgiant į bandymo baseino galimybes. Modelio dydis turi būti tinkamo dydžio, kad bangų interferencijos įtaka bandymo rezultatams būtų kuo mažesnė. Maksimali interferencija pasireiškianti bandymų baseine esant bangoms į laivapriekį pateikta grafiškai 35 pav. priklausomai nuo modelio ilgio, pločio, baseino pločio ir frūdo skaičiaus.

---

<sup>1</sup> International Towing Tank Conference



35 pav. Maksimalus bangų dažnis kuriam esant psireiškia bangų interferencija

### **Tanko matmenys**

Laisvas vandens plotas bandymų baseine turi būti pakankamo dydžio, dėl galimos bangų interferencijos. Vandens gylis yra svarbus dėl hidrodinaminio efekto.

### **Bangų derinimas ir eksperimento trukmė**

Atliekant eksperimentą esant modeliui pastovioje padėtyje, bangų parametrai turi būti išmatuojami prieš atliekant eksperimentą būtent toje vietoje kur bus modelis, taip atliekama, norint užtikrinti bangų parametrų tikslumą. Judantiems modeliams bangų parametrų tikslumas užtikrinamas atliekant matavimus keliose fiksuotose vietose išilgai modelio judėjimo kelio. Pakartotinai atliekami derinimo bandymai ir paruošiama bangų derinimo dokumentacija. Bangografi privalo būti tikrinami reguliariai, užtikrinama jų matavimų kokybė.

### **Modelio suvaržymas**

Modelio suvaržymui naudojamos nedidelio tamprumo inkaravimo virvės. Priklausomai nuo eksperimento tikslo, kuomet vieta ir gylis yra ribojami rekomenduojama naudoti suvaržymus, kurie užtikrintų tinkamas nelinejines inkaravimo sistemos charakteristikas. Atliekant eksperimentą vandenyje judantiems modeliams rekomenduojama modeliui įtaisyti propulsinę sistemą. Kita vertus, jeigu modelis yra buksyruojamas, rezultatai gaunami tikslesni, nes tiksliau yra modeliuojamas išilginis laivo supimasis. To pasiekama atliekant pastovios jėgos ar momento buksyravimą.

### **Bangų periodai ir aukščiai**

Norint išsamiai atvaizduoti laivo supimosi intensyvumo amplitudes priklausomai nuo bangų dažnių gali prireikti 20 ir daugiau eksperimentų. Tiriami jūriniai objektai bangose gali veikti kaip

nelinijinė sistema. Nelinijinė reakcija priklauso nuo bangų aukščio, rekomenduojama šias sistemas patikrinti atliekant eksperimentą su skirtingais bangų aukščiais pagal pasirinktus bangų periodus, ypač artimus rezonansui.

### **Bangografų išdėstymas**

Bangografų išdėstymo vieta turi būti nurodoma atliekant bangų derinimą ir patį eksperimentą tuomet galima atlikti signalų ir jų fazių koregavimą numatytoje vietoje. Bangografai turi būti išdėstyti taip, kad būtų kuo mažesnė modelio įtaka matavimų rezultatams.

### **Pakartotiniai bandymai**

Pakartotiniai bandymai pasirinktam dažniui turi būti atliekami priešinga eilės tvarka.

### **Matavimų rezultatai**

Kuomet pateikiami matavimų rezultatai gauti skirtingais prietaisais, turi būti nurodomas jų tikslumas.

### **Rezultatų apdorojimo metodika**

Eksperimento metu yra išmatuojami modelio kampiniai ir linijiniai judėjimai ir juos charakterizuojantys dydžiai: supimosi kampas, greitis, pagreitis. Naudojant šiuos išmatuotus dydžius yra apskaičiuojami supimosi intensyvumą charakterizuojantys santykiniai dydžiai pagal šias pagrindines formules:

$$RAO_{\psi} = \frac{\psi \lambda}{360 \zeta_a}, \quad (38)$$

čia  $RAO_{\psi}$  – kilinio supimosi dinamiškumo koeficientas;  
 $\psi$  – Diferento kampas;  
 $\zeta_a$  – Bangos aukščio amplitudė;  
 $\lambda$  – Bangos ilgis.

$$RAO_{\theta} = \frac{\theta \lambda}{360 \zeta_a}, \quad (39)$$

čia  $RAO_{\theta}$  – bortinio supimosi dinamiškumo koeficientas;  
 $\theta$  – kreno kampas;  
 $\zeta_a$  – Bangos aukščio amplitudė;  
 $\lambda$  – Bangos ilgis.

$$RAO_Z = \frac{Z}{\zeta_a}, \quad (40)$$

čia  $\zeta_a$  – Bangos aukščio amplitudė;  
 $RAO_Z$  – vertikalaus supimosi dinamiškumo koeficientas.

$$l' = \frac{a}{g\zeta_a}, \quad (41)$$

čia  $l'$  – bedimensinis pagreitis;  
 $a$  – Tiriamo judėjimo pagreiti;  
 $g$  – laisvojo kritimo pagreitis;  
 $\zeta_a$  – Bangos aukščio amplitudė.

Bandymo rezultatai yra vaizduojami grafiškai: horizontaliojoje ašyje atidedami bangų dažniai, vertikaliojoje ašyje dinamiškumo koeficientai nusakantys supimosi intensyvumą. Pasinaudojus šiais grafikais galima pastebėti kokie bangų dažniai sukelia didžiausią laivo supimosi intensyvumą, taip pat eksperimento eigoje padeda surasti rezonansinį bangų dažnį. Bandymo ataskaitoje pateikiami absoliutūs ir santykiniai supimosi pagreičiai, greičiai iš kurių galima galutinai įvertinti laivo supimosi intensyvumą ir jo galima poveikį žmogui.

Eksperimento pradžioje paruošiama eksperimento programa t.y nustatomi bangų parametrai, kurie vėliau bus derinami bandymų baseine. Bangų parametrai nustatomi pagal jų periodą. Parenkama tam tikra eilė bangų periodų ir apskaičiuojami bangų parametrai pagal šias formules:

$$F = \frac{\sqrt{k}}{T} \quad (42)$$

čia  $T$ -bangos periodas;  
 $k$ -laivo modelio mastelis;  
 $F$ -Bangos dažnis.

Apskaičiuojamas apskritiminis bangos dažnis:

$$F_b = 2\pi F \quad (43)$$

čia  $F_b$ -Bangos dažnis;  
 $F$ -Bangos dažnis.

Apskaičiuojamas bangų skaičius:

$$k = \frac{F_b^2}{g} \quad (44)$$

čia  $k$ -bangų skaičius;  
 $F_b$ -bangos dažnis;  
 $g$ - laisvojo kritimo pagreitis.

Surandamas bangos ilgis:

$$\lambda = 2\pi/k$$

čia  $\lambda$ -bangos ilgis;  
k-bangų skaičius; (45)

Apskaičiuojama bangos amplitudė:

$$\zeta_a = \frac{\lambda}{50 \cdot 2} \quad (46)$$

čia  $\lambda$ -bangos ilgis;  
 $\zeta_a$ -Bangos aukščio amplitudė.

Apskaičiuojamas bangos statusas:

$$S_w = \left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \arctg\left(\frac{\zeta_a}{0,5} \cdot \lambda\right) \quad (47)$$

čia  $S_w$ -bangos statusas;  
 $\lambda$ -bangos ilgis;  
 $\zeta_a$ -Bangos aukščio amplitudė.

Turint bangos periodą, dažnį ir ilgį bangos yra derinamos bandymų baseine generuojant bangas ir matuojant jų parametrus. Taip yra apskaičiuojami visų bangų parametrai pagal bangų periodus ir suderinami bandymų baseine.

Suderinus bangas bandymų baseine modelis yra dinamiškai balansuojamas, nustatomos inercinės charakteristikos atitinkančios prototipą, tai pat vertikalus svorio centras atliekant krenavimo bandymą.

## 2.5 Modelio gamyba ir paruošimas eksperimentui

Modelio gaminimas atliekamas pagal ITTC taikomą procedūrą (ITTC, 7.5-01-01-01). Pagrindinis reikalavimas laivo modeliui yra geometrinis panašumas. Modelio korpuso gaminimui naudojamos šios medžiagos: medis, puleretano putplastis, anglies arba stiklo pluoštas. Modeliai gaminami pasitelkus CAD / CAM procesą, todėl forma išpjaunama automatizuotai, pagal turimą brėžinį. Atlikus išpjovimą toliau modelis užbaigiamas ranka. Modelio korpuso paviršius turi būti pakankamai švelnus, jo apdirbimui naudojamas 300 – 400 šiurkštumo markės šveitimo popierius. Nušveitus modelį, jis yra padengiamas specialia danga ir nudažomas dažais (36 pav.).



a)

b)

36 pav. Automatizuotas modelio išpjovimas

a) automatizuotai išpjautas modelio korpusas, b) užbaigtas modelis

Išilgai modelio ant jo korpuso nubrėžiami španhautai.(37 pav.). Dažniausiai yra naudojamo dešimties španhautų numeravimo sistema, pradedant nuo laivagalio nuliniu ir užbaigiant dešimtuoju laivapriekyje. Jeigu reikalingi papildomi tarpiniai španhautai, jie žymimi skaičiais su dešimtąja dalimi 9.5, 9.6 ir t.t. Vaterlinijos taip pat yra sužymimos ant modelio paviršiaus, vaizduojama linija atitinkanti apkrauto laivo grimzlę ir neapkrauto laivo grimzlę. Modelio korpusas turi atitikti nustatytą toleranciją, kuri jo pločiui, grimzlei yra taikoma  $\pm 1\text{mm}$  ir ilgiui  $\pm 0,05\%L$ .



37 pav. Modeliai ir ant jų paviršiaus žymimos linijos - atitinkančios španhautus ir vaterlinijas

Modelio paruošimas eksperimentui priklauso nuo eksperimento tipo ir eksperimento tikslo. Jeigu eksperimento tikslas yra išmatuoti lenkimo, tempimo, kirpimo jėgas veikiančias laivo modelį, tuomet laivo masių pasiskirstymas išilgai ir skersai laivo turi būti kuo tikslesnis lyginant su realaus dydžio laivu. Prototipo fizikinių dydžių santykiai su laivo modeliu pateikiami 10 lentelėje (ITTC, 7.5-02-07-02).

10 lentelė. Modelio fizikinių dydžių santykiai su realiu laivu

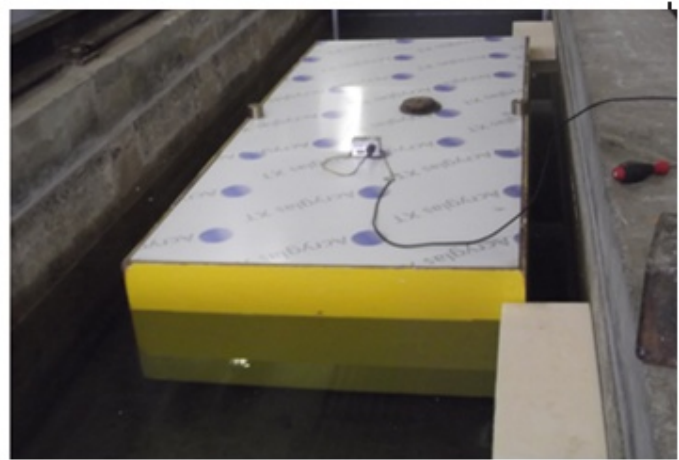
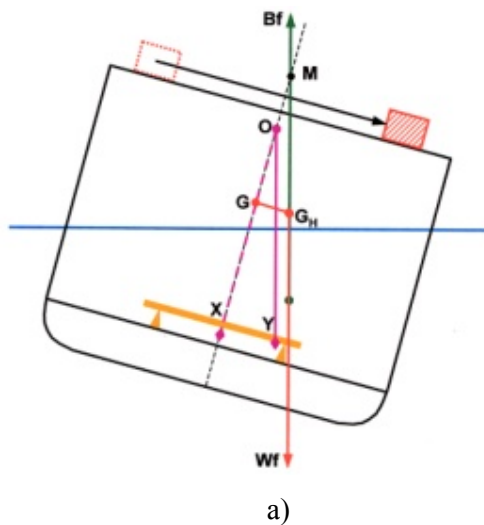
Dydis	Prototipo	Idealaus modelio	Praktinio modelio
Laivo ilgis	L	$L/\lambda$	$L/\lambda$
Vandens	$\rho$	$\rho/c$	$\rho/c$
Laikas	t	$t/\lambda^{1/2}$	$t/\lambda^{1/2}$
Masė	m	$m/c\lambda^3$	$m/c\lambda^3$
Greitis	v	$v/\lambda^{1/2}$	$v/\lambda^{1/2}$
Pagreitis	a	a	a
Jėga	F	$F/c\lambda^3$	$F/c\lambda^3$
Vandentalpa	V	$V/c\lambda^3$	$V/c\lambda^3$
Momentas	M	$M/c\lambda^4$	$M/c\lambda^4$
Slėgis	P	$P/c\lambda$	$P/c\lambda$
Dažnis	$\omega$	$\omega/\lambda^{1/2}$	$\omega/\lambda^{1/2}$
Atsparumo	EI	$EI/c\lambda^5$	$EI/c\lambda^5$
Atsparumo	KAG	$KAG/c\lambda^3$	$KAG/c\lambda^3$
Elastingumo	E	$E/c\lambda$	$E/e$
Inercijos	I	$I/\lambda^4$	$Ie/c\lambda^5$

$\lambda$ -prototipo ir modelio ilgių santykis;  
c- Prototipo ir modelio vandens masių tankių santykis;  
e- Prototipo ir modelio elastingumo modulio santykis;

Atliekant kitus eksperimentus supimosi eksperimentą pakanka, kad laivo inercijos spindulys ir vertikalus svorio centras atitiktų realaus laivo reikšmes tik tam tikrame mastelyje. Priklausomai nuo laivo inercijos spindulio reikšmės laivo modelio supimosi periodas gali būti vienodas arba skirtis nuo realaus laivo priklausomai nuo modelio mastelio, kai šie dydžiai yra apytikriai vienodi įvertinus modelio masteli laikoma, kad elementarios modelio korpuso masės pasiskirsčiusios tinkamai.

Krenavimo bandymas praktiškai atliekamas visiems modeliams, nes būtina nustatyti vertikalų svorio centro padėtį ir prireikus keisti norima linkme. Šis eksperimentas atliekamas panaudojant elektroninį inklinometrą. Eksperimentas atliekamas tipiškai: laivo modelio midelio rajone yra uždedamas inklinometras ir bortų kraštuose uždedami vienodo dydžio svoriai (38 pav.). Vieną iš šių svorių nuėmus laivas pradeda svyruoti, eksperimento rezultatai fiksuojami ir apdorojami specialia programine įranga. Analogiškai krenavimo bandymas gali būti atliekamas panaudojant svambalą. Šiuo atveju kreno kampai matuojami liniuotės pagalba stebint svambalo atsilenkimus.

Atliekant eksperimentą kreno kampas turi būti kuo mažesnis, nes esant mažiems kreno kampams laivo svorio centras beveik nepasislenka iš dimetralinės plokštumos, todėl rezultatai gaunami tikslesni. Jeigu kreno kampas matuojamas inklinometru, modelio kreno kampas rekomenduojamas iki 0.5 laipsnių.



38 pav. Krenavimo bandymas panaudojant: a) svambalą, b) inklinometrą

Dinaminio kalibravimo esmė – modelio masės inercijos momento nustatymas bei jo keitimas. Masės inercijos momentas ašies atžvilgiu yra inertiškumo matas ir lygus sumai elementarių masių sandaugų su atstumų tarp masės centro ir ašies kvadratais.

Atliekant dinaminį modelio tarvimą pasiekiamas laivo ir jo modelio masės inercijos momentų atitikimas (Čerka, 1997).

Pagal Struchalio panašumo kriterijų, laivo ir jo modelio svyravimo periodai susieti taip:

$$T_i = (T_i)_m \cdot k^{-0.5} \quad (48)$$

čia  $k$  – modelio mastelis;  
 $(T_i)_m$  – modelio svyravimų periodas.

Šie reikalavimai įgyvendinami perkeliant modelyje specialius krovinis arčiau arba toliau nuo svyravimų ašies.

Modelis pakreipiamas ir jam leidžiama laisvai svyruoti. Chronometru išmatuojamas svyravimų periodas. Modelio svyravimų periodas priklauso nuo jo charakteristikų taip:

$$\tau_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{\Delta h_1}}$$

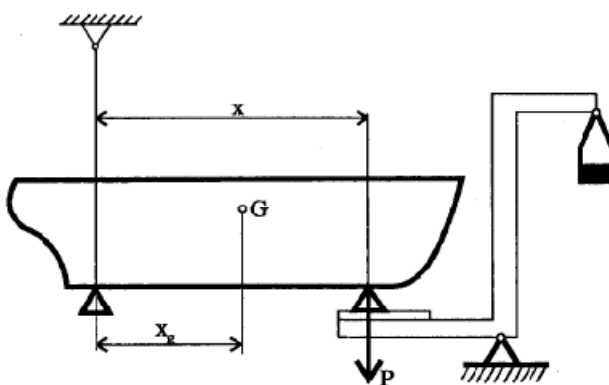
čia  $\tau_1$  – modelio svyravimų periodas;  
 $I_0$  – modelio masės inercijos momentas svyravimų ašies atžvilgiu;  
 $h_1$  – atstumas tarp svyravimų ašies ir modelio svorio centro;  
 $\Delta$  – modelio svorinė vandentalpa.

Modelio svorio centro abscisę galima nustatyti svarstyklėmis pakabinus modelį už dviejų pakabų (39 pav.). Tegu  $x$  – atstumas tarp laivagalinio pakabinimo ir laivapriekinės atramos, esančios ant

svarstyklį;  $x_g$  – atstumas tarp laivo modelio svorio centro ir laivagalinio pakabinimo;  $P$  – slėgis į laivagalinę atramą, nustatomas iš svarstyklių parodymo. Užrašome svorių lygtį:

$$x_g = Px/\Delta_m \quad (49)$$

čia  $\Delta_m$  – Modelio svorinė vandentalpa.



39 pav. Laivo modelio svorio centro abscisės nustatymas

## 2.6 Reikiamos laboratorinės įrangos parinkimas

Laivo modelio supimosi eksperimentas buvo atliktas Kelvin Hydrodynamics laboratorijoje. Šioje laboratorijoje eksperimentams atlikti yra naudojama ši laboratorinė įranga:

- Bandymų baseinas, kurio ilgis 76m. Plotis 4.6m. Gylis 2.5m. (40 pav.)



40 pav. Bandymo baseinas

- Vežimas, kurio parametrai 5m x 5m., įrengtas kompiuterizuotas valdymo pultas, maksimalus vežimo greitis 5 m/s.
- Klavišinis bangų generatorius, kuris generuoja reguliarias ir nereguliarias bangas iki 0,5m aukščio priklausomai nuo vandens lygio (41 pav.)



a)

b)

41 pav. a) bangų sugėrimo paplūdimys, b) bangų generatorius

- Tanko gale įrengtas dirbtinis aukštos kokybės paplūdimys, kuris sugeria iki 95 procentų bangų energijos, todėl bangų atsispindėjimas minimalus (41 pav.).
- Duomenų gavimo įranga: modulinė duomenų surinkimo ir kontrolės sistema, iki 64 įvesties bei 20 išėjimo kanalų, duomenų fiksavimo dažnis iki 60kHz.
- Testuojami laivo modeliai paprastai gali siekti iki 4m ilgio. Laivų modeliai ir kiti plaukuojantys įrenginiai yra vertinami taikant realiu laiku veikiančią bekontaktę infraraudonųjų spindulių 4 – rių kamerų sistemą. Ant testuojamo objekto montuojami keturi jutikliai, kuriuos filmuoja atskiros keturios *Qualisys* kameros.
- Jėgos matavimo dinamometrai.
- 3 *AXOS* skysčio greičio matavimo sistema.

Laboratorijoje naudojami dviejų tipų bangografs: akustiniai ir varžiniai.

Akustinio tipo bangografs (42 pav.) pasižymi šiomis savybėmis: sudėtinga elektroninė konstrukcija, aukštas tikslumas, tiesiogiai nekontaktuojantys su vandeniu, jautrūs bangų statumui.

Varžinio tipo bangografs (42 pav.) yra paprasti, dėl nesudėtingos elektroninės konstrukcijos ir mechaninių dalių, stabilūs ir patikimi, jautrūs vandeniui ir jo paviršiaus profilio kitimui.



a)

b)

42 pav. bangografs ir jų išdėstymas

a) akustinio tipo bangografas, b) varžinio tipo bangografas

Laivo judėjimas yra fiksuojamas infraraudonųjų spindulių kameromis. Šios kameros veikia reaguodamos į specialų jutiklį, kuris atspindi infraraudonuosius spindulius. Šio tipo šviesą atspindintys jutikliai yra montuojami ant laivo modelio (žr. 43 pav).



43 pav. Laivo supimosi matavimas

## 2.7 Eksperimentinis tyrimas

Pagal pasirinktus bangų periodus yra apskaičiuojami bangų parametrai. Apskaičiuoti reguliarių bangų parametrai pateikiami lentelėse (11, 12, 13, 14 lentelės).

Pagal pasirinktą bangos periodą apskaičiuojame reguliarių bangų dažnį:

$$F = \frac{\sqrt{k}}{T} = \frac{\sqrt{51}}{6} = 1.19 \text{ Hz} \quad (50)$$

čia T-bangos periodas, s;  
k-laivo modelio mastelis;  
F-Bangos dažnis, Hz.

Apskaičiuojamas apskritiminis bangos dažnis:

$$F_b = 2\pi F = 2 \cdot 3.14 \cdot 1.19 = 7.478 \text{ rad/s} \quad (51)$$

čia  $F_b$ -Bangos dažnis, rad/s;  
F-Bangos dažnis, Hz.

Apskaičiuojamas bangų skaičius:

$$k = \frac{F_b^2}{g} = \frac{7.478^2}{9.81} = 5.702 \quad (52)$$

čia k-bangų skaičius;  
 $F_b$ -Bangos dažnis, rad/s;  
g- laisvojo kritimo pagreitis,  $\text{m/s}^2$ .

Apskaičiuojamas bangos ilgis:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2 \cdot 3.14}{5,702} = 1.102 \text{ m} \quad (53)$$

čia  $\lambda$ -bangos ilgis, m;  
k-bangų skaičius;

Apskaičiuojama bangos amplitudė:

$$\zeta_a = \frac{\lambda}{50 \cdot 2} = \frac{1,102}{50 \cdot 2} = 0.011 \text{ m} \quad (54)$$

čia  $\lambda$ -bangos ilgis, m;  
 $\zeta_a$ -Bangos aukščio amplitudė, m.

Apskaičiuojamas bangos statusas:

$$S_w = \left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \arctg\left(\frac{\zeta_a}{0,5} \cdot \lambda\right) = \left(\frac{180}{3.14}\right) \cdot \arctg\left(\frac{0.011}{0.5} \cdot 1.102\right) = 1.146 \text{ m} \quad (55)$$

čia  $S_w$ -bangos statusas, laip.;  
 $\lambda$ -bangos ilgis, m;  
 $\zeta_a$ -Bangos aukščio amplitudė, m.

Visi kiti reguliarių bangų parametrai yra apskaičiuojami analogiškai.

11 lentelė. Bangavimo parametrai

Eksperimento sąlyga	90 laipsnių krypties bangavimas								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Bangos periodas, s	1.124	1.530	1.998	2.529	3.122	3.778	4.496	5.277	6.120
Bangos aukštis, m	1.190	1.020	0.893	0.793	0.714	0.649	0.595	0.549	0.510
Dažnis, Hz	7.478	6.410	5.609	4.986	4.487	4.079	3.739	3.452	3.205
Bangų skaičius k	5.702	4.189	3.207	2.534	2.053	1.696	1.425	1.215	1.047
Bangos ilgis, m	1.102	1.500	1.959	2.479	3.061	3.704	4.408	5.173	6.000
$\lambda / L$	0.367	0.500	0.653	0.826	1.020	1.235	1.469	1.724	2.000
Bangos amplitudė, m	0.011	0.015	0.020	0.025	0.031	0.037	0.044	0.052	0.060
Bangos statusas, laipsn.	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146

12 lentelė. Bangavimo parametrai

Eksperimento sąlyga	90 laipsnių krypties bangavimas								
	15	16	20	9.5	10.5	10	17.25	18.5	10
Bangos periodas, s	7.025	7.993	12.489	2.818	3.442	3.122	9.291	10.686	3.122
Bangos aukštis, m	0.476	0.446	0.357	0.752	0.680	0.714	0.414	0.386	0.714
Dažnis, Hz	2.991	2.804	2.244	4.723	4.273	4.487	2.601	2.425	4.487
Bangų skaičius k	0.912	0.802	0.513	2.274	1.862	2.053	0.690	0.600	2.053

Bangos ilgis, m	6.887	7.836	12.244	2.763	3.375	3.061	9.108	10.476	3.061
$\lambda / L$	2.296	2.612	4.081	0.921	1.125	1.020	3.036	3.492	1.020
Bangos amplitudė, m	0.069	0.078	0.122	0.028	0.034	0.031	0.091	0.105	0.031
Bangos statusas, laipsn.	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146

13 lentelė. Bangavimo parametrai

Eksperimento sąlyga	180 laipsnių krypties bangavimas									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Bangos periodas, s	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Bangos aukštis, m	1.124	1.530	1.998	2.529	3.122	3.778	4.496	5.277	6.120	
Dažnis, Hz	1.190	1.020	0.893	0.793	0.714	0.649	0.595	0.549	0.510	
Bangos dažnis, rad/s	7.478	6.410	5.609	4.986	4.487	4.079	3.739	3.452	3.205	
Bangų skaičius k	5.702	4.189	3.207	2.534	2.053	1.696	1.425	1.215	1.047	
Bangos ilgis, m	1.102	1.500	1.959	2.479	3.061	3.704	4.408	5.173	6.000	
$\lambda / L$	0.367	0.500	0.653	0.826	1.020	1.235	1.469	1.724	2.000	
Bangos amplitudė, m	0.011	0.015	0.020	0.025	0.031	0.037	0.044	0.052	0.060	
Bangos statusas, laipsn.	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	

14 lentelė. Bangavimo parametrai

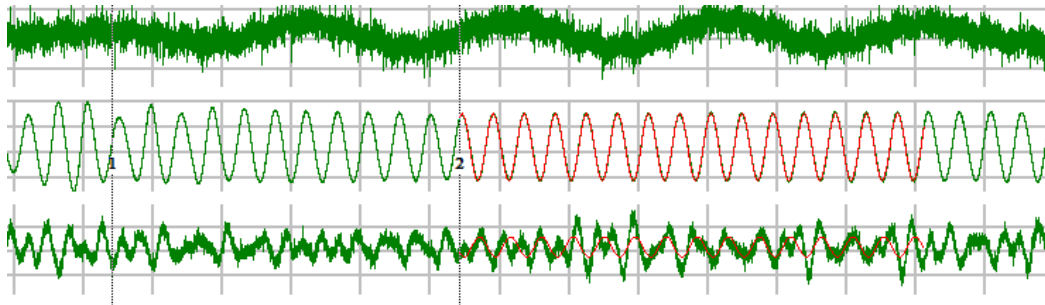
Eksperimento sąlyga	180 laipsnių krypties bangavimas									
	15	16	20	11	12	17.25	18.5	11	18.5	
Bangos periodas, s	15	16	20	11	12	17.25	18.5	11	18.5	
Bangos aukštis, m	7.025	7.993	12.489	3.778	4.496	9.291	10.686	3.778	10.686	
Dažnis, Hz	0.476	0.446	0.357	0.649	0.595	0.414	0.386	0.649	0.386	
Bangos dažnis, rad/s	2.991	2.804	2.244	4.079	3.739	2.601	2.425	4.079	2.425	
Bangų skaičius k	0.912	0.802	0.513	1.696	1.425	0.690	0.600	1.696	0.600	
Bangos ilgis, m	6.887	7.836	12.244	3.704	4.408	9.108	10.476	3.704	10.476	
$\lambda / L$	2.296	2.612	4.081	1.235	1.469	3.036	3.492	1.235	3.492	
Bangos amplitudė, m	0.069	0.078	0.122	0.037	0.044	0.091	0.105	0.037	0.105	
Bangos statusas, laipsn.	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	1.146	

## 2.8 Eksperimento rezultatų apdorojimas

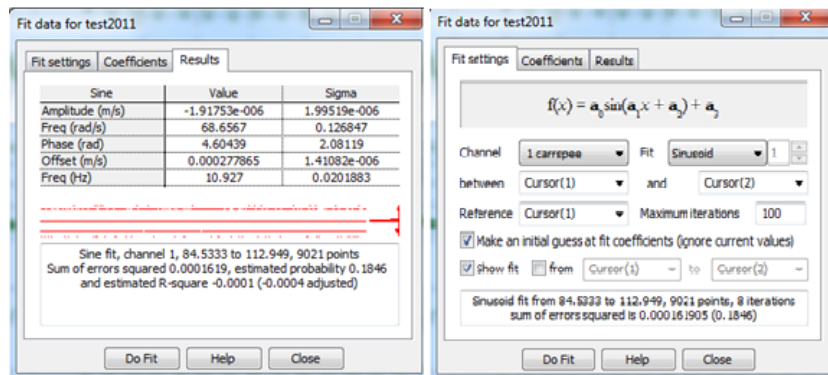
Supimosi bandymo rezultatai tiesiogiai iš supimaši matuojančių infraraudonųjų spindulių kamerų perduodami į signalo stiprintuvą ir į kompiuterį apdorojimui. Kompiuteryje rezultatų gavimui ir apdorojimui naudojama „Spike2“ programine įranga. Programa įrašo nagrinėjamo laivo svyravimų signalus priklausomai nuo laiko. Baigus eksperimentą programoje nustatomas eksperimento rezultatų intervalas iš kurio bus imami eksperimento rezultatai. Panaudojant išmatuotų dydžių signalų kreives yra apskaičiuojama kreivė galinti aprašyti nurodyta judėjimą matematine funkcija. Gauta kreivė naudojama eksperimento rezultatų apdorojimui, iš jos gaunama judėjimo amplitudė, dažnis, fazė.

Atliekant laivo supimosi eksperimento rezultatų apdorojimą programoje yra įkeliami kursoriai (44 pav.), kuriais nurodomas duomenų analizavimo intervalas. Nurodžius duomenis iš *Analysis / Fit*

data yra pasirenkami kursoriai tarp kurių bus sudaroma judesį aprašanti funkcija. Reguliaraus supimosi atveju pasirenkama *sin* matematinė funkcija su tam tikrais koeficientais. Paspaudus *Do Fit* apskaičiuojami matematinės funkcijos koeficientai ir nubrėžiama kreivė atitinkanti eksperimento duomenis. *Results* stulpelyje pateikiami rezultatai (45 pav.). Supimosi eksperimento duomenis ir gauti rezultatai pateikiami lentelių forma (15, 16, 17, 18 lentelės).



44 pav. Ekperimento duomenų analizė



45 pav. Eksperimento rezultatų apdorojimas

15 lentelė. Eksperimento rezultatai (90 laipsnių bangavimas)

Temp C	15.3								
T, s	30.91	21.66	31.09	22.49	18.90	16.40	21.18	28.01	23.82
1/T, Hz	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04
Diferentas, deg	0.11	0.03	0.09	0.03	0.21	0.21	0.16	0.17	0.13
Krenas, deg	0.67	1.25	3.88	9.41	15.07	15.07	8.28	6.06	5.80
Z, mm	11.14	13.27	20.22	22.39	40.22	40.22	43.48	58.90	65.44
Wp2, mm	8.49	14.79	16.80	26.20	39.81	39.81	41.72	63.22	75.34
Fixed pro, mm	10.72	13.62	19.19	25.07	37.44	37.44	45.66	61.16	71.21
Diferento RAO	0.03	0.01	0.02	0.01	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04
Kreno RAO	0.19	0.35	1.08	2.61	4.19	4.19	2.30	1.68	1.61
Vertikalaus sup. RAO	1.01	0.88	1.03	0.90	1.31	1.09	0.99	1.14	0.95

16 lentelė. Eksperimento rezultatai (90 laipsnių bangavimas)

Temp C	15.3							
T, s	27.63	20.03	18.49	22.41	30.81	30.60	29.50	15.48
1/T, Hz	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.06
Diferentas, deg	0.13	0.13	0.09	0.17	0.19	0.02	0.12	0.27
Krenas, deg	5.72	5.97	20.63	19.89	18.61	4.88	4.94	21.23
Z, mm	72.11	110.27	28.79	32.04	14.97	89.84	107.37	20.43
Wp2, mm	80.55	111.30	27.51	34.81	14.18	77.61	106.88	18.77
Fixed pro, mm	86.32	122.92	28.63	32.87	14.35	81.65	105.33	19.72
Diferento RAO	0.04	0.04	0.02	0.05	0.05	0.00	0.03	0.07
Kreno RAO	1.59	1.66	5.73	5.53	5.17	1.36	1.37	5.90
Vertikalaus sup. RAO	0.92	0.90	1.04	0.95	0.49	0.99	1.02	0.67

17 lentelė. Eksperimento rezultatai (180 laipsnių bangavimas)

Temp C	15.3								
Bangos periodas (s)	6	7	8	9	10	11	12	13	14
T, s	40.199	30.745	34.001	17.613	17.613	30.464	30.738	28.441	24.192
1/T, Hz	0.025	0.033	0.029	0.057	0.057	0.033	0.033	0.035	0.041
diferentas, laipsn	0.106	0.220	0.420	1.098	2.049	2.049	2.674	2.848	3.164
krenas, laipsn	0.068	0.089	0.037	0.305	0.133	0.133	0.202	0.134	0.162
Z, mm	1.009	2.638	3.541	4.088	12.077	12.077	24.993	35.753	45.750
Wp2, mm	6.885	12.355	17.119	26.779	29.176	29.176	41.155	48.976	57.284
Fixed pro, mm	10.782	13.951	18.529	23.293	28.288	28.288	46.844	50.643	59.943
diferento RAO	0.030	0.061	0.117	0.305	0.569	0.569	0.743	0.791	0.879
kreno RAO	0.019	0.025	0.010	0.085	0.037	0.037	0.056	0.037	0.045
Vertikalaus sup. RAO	0.092	0.176	0.181	0.165	0.395	0.326	0.567	0.691	0.763

18 lentelė. Eksperimento rezultatai (180 laipsnių bangavimas)

Temp C	15.3								
Bangos periodas (s)	15	16	20	11	12	17.25	18.5	11	18.5
T, s	26.31	25.131	25.910	30.221	28.319	34.097	28.849	12.863	20.896
1/T, Hz	0.03	0.040	0.039	0.033	0.035	0.029	0.035	0.078	0.048
Diferentas, deg	3.34	3.253	3.816	2.746	2.651	3.328	4.117	3.530	4.145
Krenas, deg	0.11	0.105	1.040	0.291	0.129	0.119	0.095	0.302	0.177
Z, mm	55.95	72.149	119.220	21.722	24.287	81.048	84.560	28.504	84.359
Wp2, mm	64.10	72.879	112.815	37.245	42.916	87.870	107.890	47.282	108.591
Fixed pro, mm	68.83	79.038	128.658	37.238	44.035	85.213	102.788	46.206	101.639
Diferento RAO	0.928	0.904	1.060	0.763	0.736	0.924	1.144	0.981	1.151
Kreno RAO	0.031	0.029	0.289	0.081	0.036	0.033	0.026	0.084	0.049
Vertikalaus sup. RAO	0.812	0.921	0.974	0.586	0.551	0.890	0.807	0.770	0.805

### III. SKAIČIAVIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

Palyginame gautus supimosi skaičiavimų rezultatus su eksperimento duomenimis. Surandame vidutinį procentinį skirtumą tarp skaičiavimo rezultatų ir eksperimentu gautų duomenų. Rezultatus pateikiame 19 – 22 lentelėse).

19 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 90 laipsnių bangų krypčiai

Bangos Periodas (s)	6	7	8	9	10	11	12
Bangos aukštis (m)	1.124	1.530	1.998	2.529	3.122	3.778	4.496
Bangos dažnis, Rad/s	1.047	0.898	0.785	0.698	0.628	0.571	0.524
Bangos ilgis, m	56.20	76.49	99.91	126.45	156.11	188.90	224.80
Bangos amplitudė, m	0.562	0.765	0.999	1.265	1.561	1.889	2.248
vertikalus supimasis sk, m	0.738	1.103	1.362	1.620	1.860	2.150	2.460
Krenas sk <sup>2</sup> , laipsniai	1.660	2.720	4.580	8.090	17.940	23.000	13.900
Z eksp, mm	0.568	0.677	1.031	1.142	2.051	2.051	2.217
Krenas eksp, laipsniai	0.673	1.254	3.877	9.411	15.066	15.066	8.275
skirtumas kreno, %	59	54	15	-16	16	34	40
skirtumas Z, %	23	-63	-32	-42	9	-5	-11
Vertikalaus sup.Vidutinis skirtumas %	17						
Bortinio sup.Vidutinis skirtumas %	28						

20 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 90 laipsnių bangų krypčiai

Bangos Periodas (s)	13	15	16	20	9.5	10.5	17.25	18.5
Bangos aukštis (m)	5.277	7.025	7.993	12.489	2.818	3.442	9.291	10.686
Bangos dažnis, Rad/s	0.483	0.419	0.393	0.314	0.661	0.598	0.364	0.340
Bangos ilgis, m	263.8	351.2	399.6	624.4	140.8	172.1	464.5	534.29
Bangos amplitudė, m	2.638	3.513	3.996	6.244	1.409	1.721	4.645	5.343
vertikalus supimasis sk, m	2.810	3.610	4.060	6.210	1.740	2.000	4.680	5.340
Krenas sk, laipsniai	10.170	7.060	6.360	4.980	11.640	23.270	5.890	5.710
Z eksp, mm	3.004	3.337	3.678	5.624	1.468	1.634	4.582	5.476
Krenas eksp, laipsniai	6.059	5.804	5.725	5.971	20.627	19.893	4.878	4.942
skirtumas kreno, %	40	18	10	-20	-77	15	17	13
skirtumas Z, %	6	-8	-10	-10	-19	-22	-2	2
Vertikalaus sup.Vidutinis skirtumas %	17							
Bortinio sup.Vidutinis skirtumas %	28							

21 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 180 laipsnių bangų krypčiai

Bangos periodas (s)	6	7	8	9	10	11	12
Bangos aukštis (m)	1.124	1.530	1.998	2.529	3.122	3.778	4.496
Bangos aukščio amplitudė (m)	0.011	0.015	0.020	0.025	0.031	0.037	0.044
bangos dažnis, rad/s	1.047	0.898	0.785	0.698	0.628	0.571	0.524
Bangos ilgis, m	56.200	76.495	99.912	126.451	156.112	188.895	224.801
vertikalus supimasis, m	0.017	0.076	0.107	0.196	0.488	0.856	1.330

<sup>2</sup> Rezultatai gauti apskaičiuojant kompiuterine programa „Seakeeper“

diferentas, laipsniai	0.325	0.374	0.729	2.363	3.321	3.883	4.166
Diferentas eksp, laipsniai	0.106	0.220	0.420	1.098	2.049	2.746	2.674
Z eksp, m	0.051	0.135	0.181	0.208	0.616	1.108	1.275
diferentas, skirtumas %	-205	-70	-74	-115	-62	-41	-56
vertikalusis supimasis, skirtumas %	66	43	41	6	21	23	-4
Vertikalaus sup.Vidutinis skirtumas %	18						
kilinio sup.Vidutinis skirtumas %	60						

22 lentelė. Seakeeper ir eksperimento rezultatų palyginimas, 180 laipsnių bangų kryptčiai

Bangos periodas (s)	13	14	15	16	20	17.25	18.5
Bangos aukštis (m)	5.277	6.120	7.025	7.993	12.489	9.291	10.686
bangos dažnis, rad/s	0.483	0.449	0.419	0.393	0.314	0.364	0.340
Bangos aukščio amplitudė (m)	2.638	3.060	3.513	3.996	6.244	4.645	5.343
Bangos ilgis, m	263.8	305.9	351.2	399.6	624.4	464.5	534.2
vertikalus supimasis, m	1.808	2.345	2.856	3.408	5.860	4.118	4.890
diferentas, laipsn	4.347	4.351	4.453	4.457	4.329	4.500	4.420
Diferentas eksp, laipsniai	2.848	3.164	3.341	3.253	3.816	3.328	4.117
Z eksp, m	1.823	2.333	2.854	3.680	6.080	4.133	4.313
diferentas, skirtumas %	-	-	-	-	-	-	-
vertikalusis supimasis, skirtumas %	52.621	37.486	33.277	37.041	13.439	35.230	-7.360
Vertikalaus sup.Vidutinis skirtumas %	18						
kilinio sup.Vidutinis skirtumas %	60						

Neigiamas skirtumas procentais reiškia, kad skaičiavimų metodas prognozuoja supimosi charakteristikas didesnes už gautas eksperimento metu. Didžiausias bendras skirtumas yra kilinio supimosi skaičiavime, rezultatai gauti skiriasi nuo eksperimento duomenų vidutiniškai 60 %. Bortinio supimosi skaičiavimų rezultatai nuo eksperimento duomenų vidutiniškai skiriasi 28 %, vertikalaus supimosi skirtumas 17-18 %.

CFD metodu skaičiavimai buvo atliekami bangoms plintant 180 laipsnių kryptimi, bangavimo parametrai nurodyti 21 lentelėje (žalias stulpelis). Sudarius tankesnę skaičiavimų tinklą su papildomomis kirtimo plokštumomis rezultatų kokybė pagerėjo. Gauti rezultatai kilinio supimosi atveju skiriasi nuo eksperimento 5%, o vertikalaus supimosi skirtumas 10%.

## IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Apskaičiavus bortinį ir kilinį supimąsi „FLOW-3D“ programa gauti rezultatai labai artimi supimosi eksperimento rezultatams. Nustatėme, kad skaičiavimų tinklo parametrai turi nemažą įtaką skaičiavimų rezultatų kokybei, sudarius tinkamą skaičiavimų tinklą pasiekiami geri rezultatai. RANS (angl. Reynolds averaged Navier – Stokes simulation) metodas yra tinkamas skaičiuoti laivo supimąsi, tačiau reikia teisingai pasirinkti skaičiuojamojo tinklo parametrus.

Skaičiuojant bortinį laivo supimąsi su naujuoju skaičiavimų tinklu reiktų transformuoti patį skaičiavimo tinklą y ašies atžvilgiu, nes šiuo atveju laivą reikia pasukti 90 laipsnių kryptimi aplink z ašį, o tinklą x ašies kryptimi reiktų sumažinti. Atlikus šį koregavimą laivo masė ir inercijos momentai programai turėtų būti užduodami paskaičiuoti kaip visam laivui.

2. Plokščiųjų skerspjūvių supimosi teorija prognozuotas bortinis laivo supimasis vidutiniškai skiriasi 28 procentais lyginant su eksperimento duomenimis, daugelyje skaičiavimų su įvairiais bangų periodais metodu prognozuojama kreno kampo amplitudė yra mažesnė už gautą eksperimento metu.

Vertikalaus supimosi skaičiavimų rezultatai lyginant su eksperimento duomenimis vidutiniškai skiriasi 18 procentų. Plokščiųjų skerspjūviu supimosi skaičiavimų metodas gali būti laikomas tinkamu vertikalaus supimosi skaičiavimui.

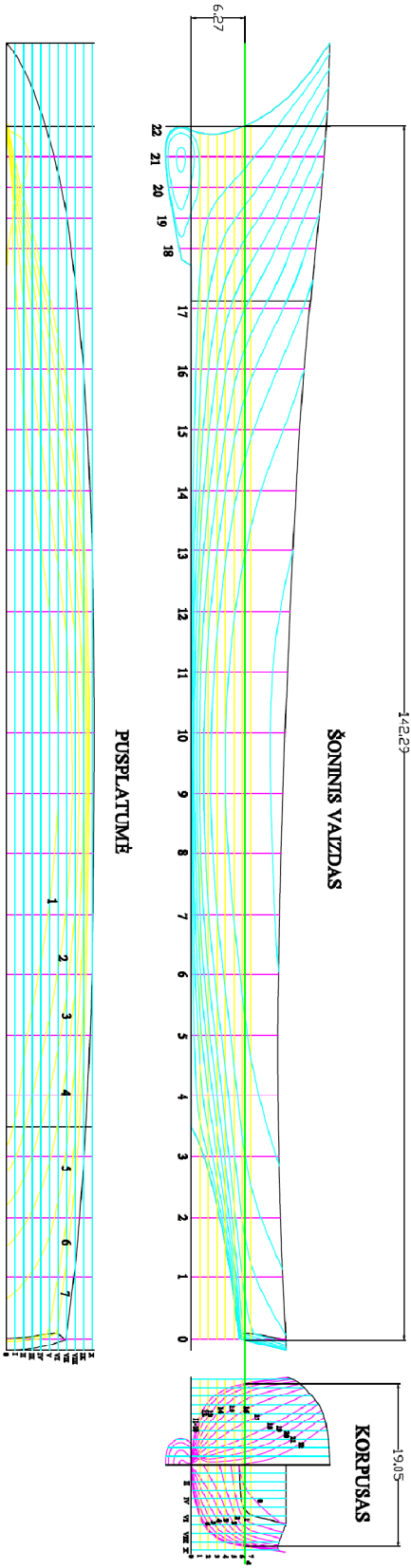
Kiliniui supimuisi skaičiavimų skirtumas lyginant su eksperimento duomenimis 60 procentų, šis metodas prasčiausiai prognozuoja šį supimosi tipą.

3. Klasikine supimosi skaičiavimų metodika paremtą skaičiavimų programą reiktų koreguoti, kad būtų galima skaičiuoti laivo supimąsi bangoms, kurių parametrai aprašomi ne pagal Cimermano formulę. Šiuo atveju bangos aukštis priklauso nuo bangos ilgio priklausomybe, kuria negalima gauti vienodų bangavimo parametrų kaip buvo atliekamas eksperimentas.

## LITERATŪRA

1. Chang, B.C. 2007. On the parametric rolling of ships using a numerical simulation method.
2. Biran, A.B. 2003. Ship Hydrostatics and Stability.
3. Chen, J., Zhu, D. 2010. Numerical simulations of wave-induced ship motions in regular oblique waves by a time domain panel method. 9th International Conference on Hydrodynamics.
4. Jaouen, F., Koop A., Vaz, G. 2011. PREDICTING ROLL ADDED MASS AND DAMPING OF A SHIP HULL SECTION USING CFD. June 19-24, 2011, Rotterdam, Netherlands.
5. Journée, J.M.J. 2000. Motions and Resistance of a Ship in Regular Following Waves. Ship Hydromechanics Laboratory, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands.
6. Journée, J.M.J., Adegeest, L. J. M. 2003. Theoretical manual of „Seaway for Windows“.
7. Walree, F. van and Carette, N. F. A. J. 2010. Validation of Time Domain Seakeeping Codes for a Destroyer Hull Form Operating in Steep Stern-quartering Seas.
8. Chen, J., Zhu, D. 2010. Numerical simulations of wave-induced ship motions in regular oblique waves by a time domain panel method. 9th International Conference on Hydrodynamics October 11-15, 2010 Shanghai, China.
9. Bo, Y., Zuo-chao, W., Ming, W. 2010. Numerical Simulation of Naval Ship's Roll Damping Based on CFD. The Second SREE Conference on Engineering Modelling and Simulation.
10. Bertram, V. 2000. Practical Ship Hydrodynamics. Great Britain
11. Weymouth, G., Wilson, R., Stern, F. 2005. RANS Computational Fluid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.
12. Отраслевой стандарт. 1981. Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов.
13. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. 1976. Справочник по статике и динамике корабля.
14. ITTC – Recommended procedures. [online] Available at:  
<[http://itcc.sname.org/2002\\_recomm\\_proc/0.0.pdf](http://itcc.sname.org/2002_recomm_proc/0.0.pdf)>> [Accessed 27 May 2013].

# PRIEDAI

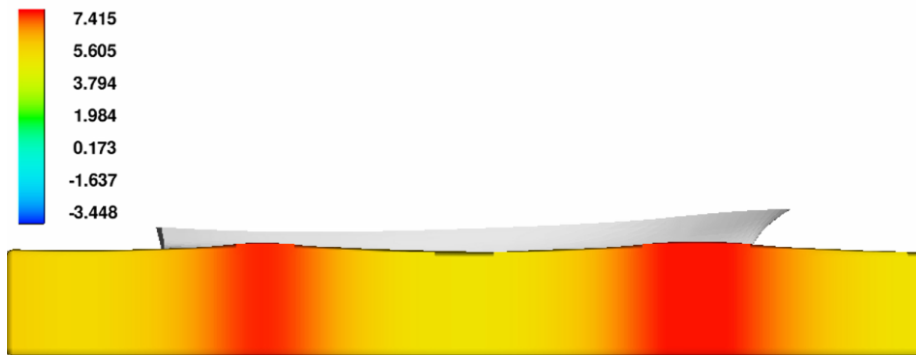


23 lentelė. Laivo pagrindiniai duomenys

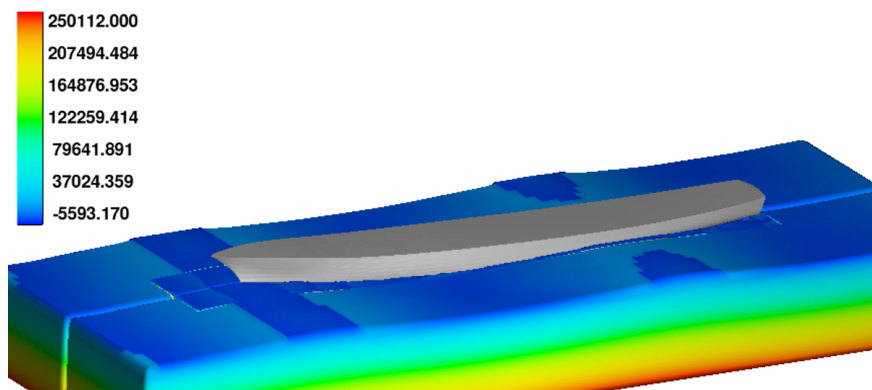
h, m	3.185
d, m	6.270
M, t	8894.950
BWL, m	19.060
LWL, m	141.947
Zg, m	6.28
r, m	5.736
Cwp	0.776
Cb	0.500
Zc, m	3.729
Cm	0.822
$k_{xx}$ , m	7.62
$k_{yy}$ , m	35
Xf, m	-77.688
Xc, m	-71.858
d-grimzlė, m; M-vandentalpa, t; Zc-povandeninės dalies tūrio centro vertikali padėtis; Xc- povandeninės dalies tūrio centro išilginė padėtis; Xf-išilginė vaterlinijos centro padėtis; BWL- vaterlinijos plotis; LWL-vaterlinijos ilgis; Cb-vandentalpos pilnumo koeficientas; Cwp- vaterlinijos pilnumo koeficientas; Cm- midelinio španhauto pilnumo koeficientas; h –skersinis metacentrinis aukštis, m; r – skersinis metacentrinis spindulys, m Zg – laivo svorio centro aplikatė, m	

24 lentelė. Modelio ir prototipo duomenys

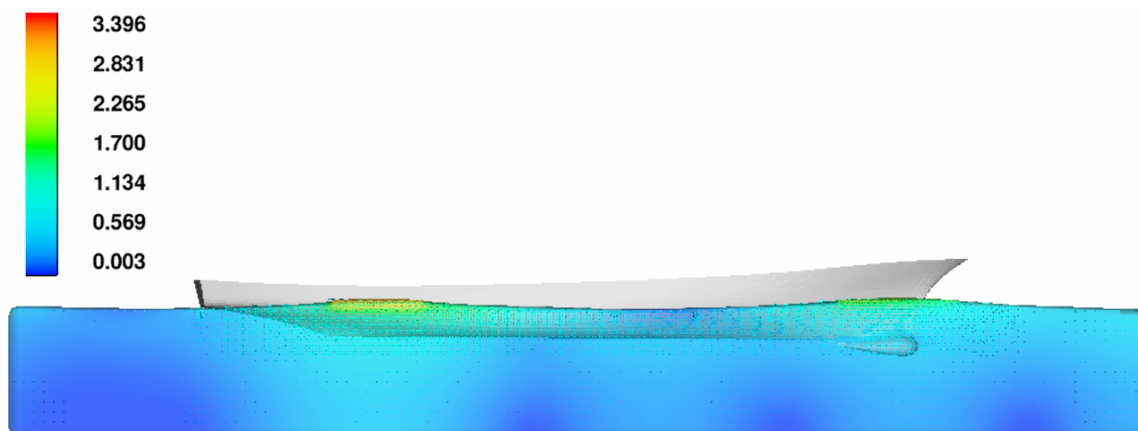
Mastelis	1:1	1:51
	Realus laivo dydžiai	Išmatuoti
Vertikalus svorio centras KG(m)	6.283	0.122981
Metacentrinis aukštis GM(m)	3.187	0.062709
Išilginė laivo svorio centro padėtis LCG(m)	71.02	1.3925
Grimzlė, m	6.27	0.0123



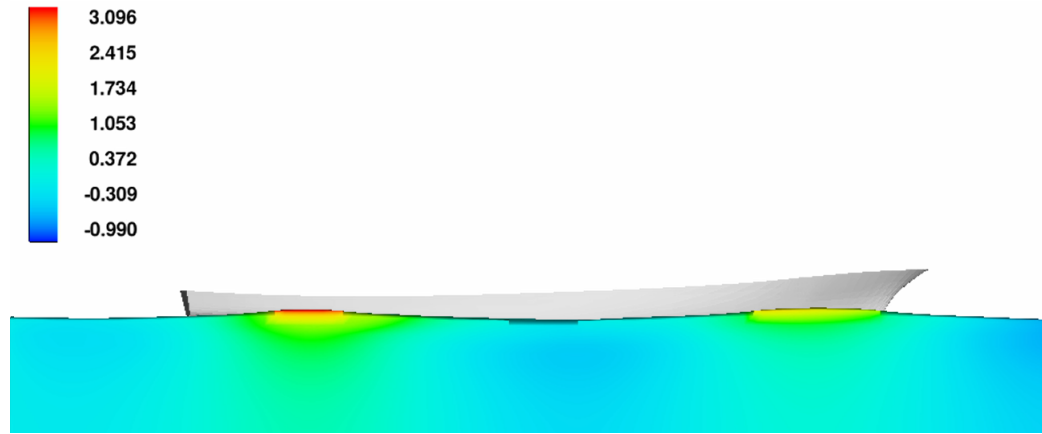
46 pav. Vandens lygio kitimas (m) priklausomai nuo bangų padėties išilgai laivo



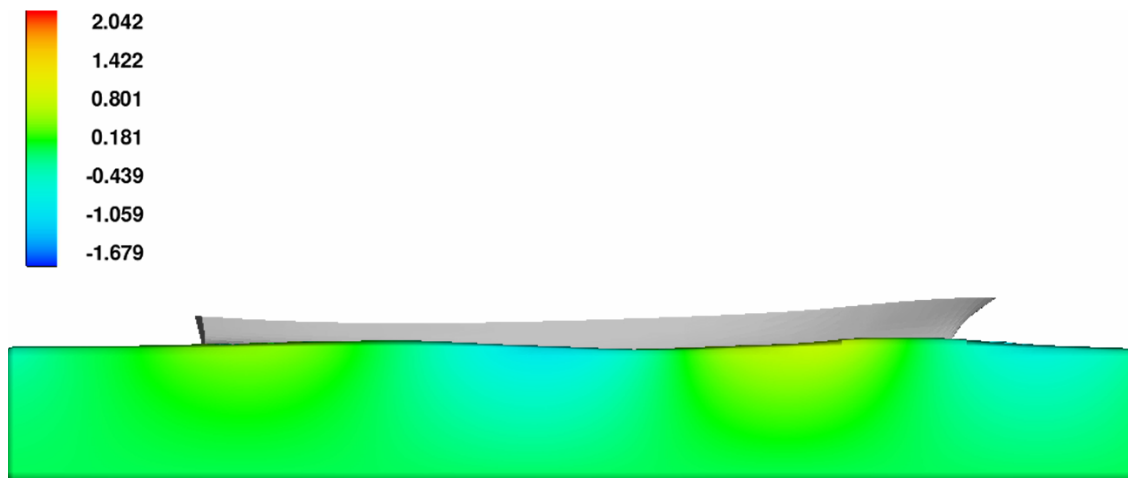
47 pav. Slėgio kitimas priklausomai nuo bangų padėties išilgai laivo



48 pav. Vandens dalelių greitis (m/s)



49 pav. Vandens dalelių greitis (m/s) x ašies kryptimi



50 pav. Vandens dalelių greitis (m/s) z ašies kryptimi