

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas
Jūrų inžinerijos katedra

Karolis Lengvinas

**KU MOKSLINIŲ TYRIMŲ LAIVO KILINIO IR
VERTIKALIAUS SUPIMOSI TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos (612H52001) magistro
baigiamasis darbas

Klaipėda, 2017

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS

Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

.....
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....
(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

Patvirtinu, kad magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.

.....
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė
ir parašas)

Sutinku, kad magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.

.....
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė
ir parašas)

Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data) (magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje
(data)

.....
(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros studijų programos vadovas

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....
(data) (studijų programos vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentais skiriu

.....
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....
(data) (studijų programos vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Jūrų inžinerijos katedros vedėjas:

.....
(data) (katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Santrauka

Lengvinas K., KU Mokslinių tyrimų laivo - katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi tyrimai. Darbo vadovas – doc. dr. V. Djačkov, konsultuojantis dėstytojas – doc. dr. J. Čerka, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2017. – 101 psl.

Šiame magistratūros baigiamajame darbe nagrinėjamas Klaipėdos universiteto mokslinių tyrimų laivo - katamarano „Mintis“ su povandeniniu sparnu kilinis ir vertikalusis supimasis.

Pradžioje baigiamojo darbo atliekama mokslinių darbų analizė, kurios esmė yra išanalizuoti su darbo tema susijusius mokslinius straipsnius, knygas ir apžvelgti pasiekimus - atradimus padarytus vėlyviausiu laikotarpiu.

Tiriamoji dalis susideda iš dviejų dalių:

Pirmojoje darbo dalyje aprašyta ir išnagrinėta katamaranų vertikalusis ir kilinis supimasis, pagrįstas linijine laivo supimosi teorija, ją sudarančios formulės ir dedamosios. Taip pat šiame skyriuje užrašomos patikslintos katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi formulės į kurias įtrauktos prijungtųjų masių ir inercinių jėgų – momentų dedamosios. Pagal šias formules toliau atliekamas matematinis supimosi eksperimentas.

Antrojoje darbo dalyje atliekami katamarano „Mintis“ su povandeniniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi tyrimai. Tyrimai atliekami dviem programomis – Djačkov V. sudaryta MS Excel programa, pagal linijinę laivo teoriją su patikslintomis formulėmis ir su skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa – „FLOW 3D“.

Paskutinėje darbo dalyje analizuojami gauti skaičiavimų rezultatai ir lyginami su Lubys D. magistro baigiamojo darbo gautais rezultatais, kuris tiria to paties objekto be povandeninio sparno vertikalusį ir kilinį supimą tokiais pačiomis sąlygomis. Rezultatai apdorojami ir nustatomas povandeninio sparno našumas – efektyvumas.

Raktiniai žodžiai: katamaranas, povandeninis sparnas, supimosi slopintuvas, kilinis supimasis, vertikalusis supimasis, katamarano supimosi eksperimentas, linijinė laivo supimosi teorija, FLOW 3D, skaičiuojamoji skysčių dinamika.

Summary

Lengvinas K., KU scientific – research catamaran vessel heaving and pitching investigations. The supervising tutor - doc. dr. V. Djačkov, the advising lecturer – doc. dr. J. Čerka, Klaipėda University: Klaipėda, 2017. – 101 p.

This Master Thesis is about heaving and pitching analysis of Klaipėda University scientific – research type vessel – catamaran with underwater fin.

Scientific works with similar subject are analyzed at the beginning of this thesis with the purpose to find the latest scientific information of researches and books about it.

Research and calculations can be separated into two parts:

In the first part, linear theory for catamaran heaving and pitching is described, including comprising formulas and its components. More supplemented formulas with complementary masses and inertia forces components included are written for heaving and pitching of the vessel. Further investigation and mathematical calculations are based on these supplemented formulas.

In the second part research of heaving and pitching are carried out for catamaran type vessel „Mintis“ with underwater fin. Calculations and research are done with two different programs – using MS Excel file which was programmed and created by Djačkov V. and based on the supplemented formulas for linear ship heaving, pitching theory and simulation program „FLOW 3D“ which works based on Computational Fluid Dynamics.

In the last part gathered and calculated results are analyzed and compared with Lubys D. Master Thesis results who done research and calculated heaving and pitching of the same vessel with same conditions just without underwater fin attached. Results are processed and underwater fin efficiency is settled.

Keywords: Catamaran, underwater fin, pitching damper, heaving, pitching, catamaran heaving and pitching experiment, linear vessel heaving and pitching theory, FLOW 3D, Computational Fluid Dynamics (CFD).

Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas

**Magistro tezes: KU Mokslinių tyrimų laivo kilinio ir vertikalios supimosi stabilizavimo tyrimai
naudojant CFD programinę įrangą.**

Magistrantas: Karolis Lengvinas

Darbo sudėtis

1. Titulinis lapas (viršelis)
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sąrašas
5. Paveikslėlių sąrašas
6. Turinys
7. Įvadas (problemos analizė)
8. Darbo tikslas ir uždaviniai
9. Literatūros analizė
10. Teorinė dalis
 - 10.1. Linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizė
 - 10.2. Linijinės laivo išilginio supimosi stabilizavimo teorijos analizė
11. Matematinis eksperimentas
 - 11.1. KU mokslinių - tyrimų laivo supimosi skaičiavimai pagal linijines laivo išilginio supimosi teorijos metodiką
 - 11.2. KU Mokslinių - tyrimų laivo supimosi skaičiavimai naudojant CFD programinę įrangą
12. Skaičiavimo rezultatų duomenų palyginimas bei analizė
13. Išvados
14. Literatūros sąrašas
15. Priedai

Užduotis išduota: 2016.10.07

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1. lentelė. Supimosi dempferavimo ir prijungtų masių koeficientai	25
2. lentelė. Pagrindiniai laivo techniniai duomenys	42
3.lentelė. Laivo ir supimosi slopintuvų parametrų nustatymas	41
4. lentelė. Laivo ir supimosi slopintuvų parametrų reikšmių aprašymas	42
5. Lentelė. Bangos parametrai.....	42
6.Lentelė. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos	43
7.Lentelė. 1m, 1.5m ir 2m pločio sparnų vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatai.....	44
8.Lentelė. KU mokslinių tyrimų laivo povandeninio sparno tvirtinimo padėčių supimosi efektyvumo rezultatai.	48
9.Lentelė. Povandeninio sparno parametrai	48
10.Lentelė. Vertikalaus ir kilinio supimosi slopinimo našumo skaičiavimo rezultatai.	65
11.Lentelė. Vertikalaus ir kilinio supimosi ekstremumų reikšmės	68
12.Lentelė. Povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi slopinimo našumų rezultatai	71

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1. pav. Povandeninio sparno tvirtinimo katamaranui schemas	17
2. pav. Katamarano povandeninio sparno tvirtinimo schema: a) iš šono, b) iš priekio	17
3. pav. Laivo supimosi stabilizavimo komponentės bangos pade ir viršūnėje bangos susidūrimo atveju	18
4. pav. Povandeninio sparno eskizas	20
5. pav. Povandeninio sparno jėgų, įtempių ir momentų suma	21
6. pav. Povandeninio sparno pjūvis (nubraižyta autoriaus).	22
7. pav. Laivo svyravimų dedamosios	28
8. pav. Reguliarios bangos profilis, bei jo dedamosios (Djačkov V., 2005).....	29
9. pav. Katamaranų ir vienkorpusių laivų, esant vienodiems korpusų ilgiams ir vienodoms vandentalpoms, amplitudinių – dažnių palyginimas: a – vertikalus supimasis prieš bangas; b – kilinis supimasis esant palydimos bangavimo sąlygoms (Djačkov V., 2005).....	31
10. pav. Prijungtosios masės koeficiento priklausomybė nuo horizontalaus katamarano klirenso (Алфёров М. Я., Мадорский Г.С., 1976).....	32
11. pav. Išvestinės $C\alpha = dC_z/d\alpha$ nustatymui naudojamas grafikas.	35
12. pav. Slėgio centro koeficiento C_d nustatymui naudojamas grafikas	35
13. pav. Išvestinei $C_m\alpha = dC/d\alpha$ nustatymui naudojamas grafikas.....	36
14. pav. Klaipėdos universiteto mokslinių tyrimų laivas „Mintis“.	39
15. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su 1m, 1.5m ir 2m pločio pasyviu laivaprieikiniu sparnu vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	46
16. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su 1m, 1.5m ir 2m pločio pasyviu laivaprieikiniu sparnu kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	47
17. pav. Povandeninio sparno galimų įrengimo vietų variacijų schemas (1 – Virš kilio linijos, 2 – Sparno apatinė plokštuma lygi kilio linijai, 3 – Po kilio linija)	48
18. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu supimosi pobūdis įvairiais laiko momentais. Laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 12 metrų.	50
19. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu supimosi pobūdis įvairiais laiko momentais. Laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 40 metrų.	50

20. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 12 metrų	51
21. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 40 metrų	51
22. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivapriekiniu sparnu vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	52
23. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivapriekiniu sparnu kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	52
24. pav. Išeigos rezultatų parametrai.....	54
25. pav. Skaiciavimo tinklelių nustatymai	55
26. pav. Aproximuota korpuso forma.....	56
27. pav. Bangas absorbuojančios zonos nustatymai	56
28. pav. 1-ojo Tinklelio sienelių nustatymai	57
29. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (1).....	58
30. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (2).....	58
31. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (3).....	59
32. pav. Duomenų rezultatų ištraukimas	61
33. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu vertikalaus supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.....	61
34. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu kilinio supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.....	62
35. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu vertikalaus supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 40 m.....	62
36. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu kilinio supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 40 m.....	63
37. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivapriekiniu sparnu ir be jo vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	64
38. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivapriekiniu sparnu ir be jo kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.	65

39. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno vertikalios supimosi „FLOW 3D“ grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.	67
40. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno kilinio supimosi „FLOW 3D“ grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.	67
41. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ vertikalios supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 12 m.	68
42. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ kilinio supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 12 m.....	68
43. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ vertikalios supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 40 m.	71
44. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ kilinio supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 40 m.....	71

TURINYS

IVADAS	11
1. MOKSLININKŲ TYRIMŲ APŽVALGA	13
2. KATAMARANŲ SUPIMOSI PROBLEMOS SPRENDIMAS	16
2.1. Katamaranų supimosi slopintuvo parinkimas	16
2.2. KU mokslinių tyrimų laivo povandeninio sparno projektavimas	18
3. TEORINĖ DALIS	23
3.1. Linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizė	23
3.2. Linijinės laivo išilginio supimosi stabilizavimo teorijos analizė	27
4. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS	41
4.1. KU mokslinių tyrimų laivo supimosi skaičiavimai pagal linijinės laivo išilginio supimosi teorijos metodiką	41
4.1.1. Supimosi skaičiavimo kompiuterinės programos aprašymas – metodika	41
4.1.2. Tiriamojo objekto – Klaipėdos universiteto mokslinio tyrimų laivo „Mintis“ aprašymas	41
4.1.3. KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ kilnio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai pagal linijinės laivo išilginio supimosi teorijos metodiką	41
4.2. KU Mokslinių tyrimų laivo supimosi skaičiavimai naudojant CFD programinę įrangą	53
5. GAUTŲ REZULTATŲ ANALIZĖ	64
IŠVADOS	74
LITERATŪRA	76
PRIEDAI	78

IVADAS

Katamaranas yra daugiakorpusis vandens transportas, turintis du lygiagrečiai sujungtus tokio pat dydžio korpusus, kuriuos jungia tarp jų esantis tiltelis. Katamaranai lyginant su tokio pat dydžio vienkorpusiais laivais turi mažesnę grimzlę ir siauresnius apvadus, kas leidžia jiems judėti didesniu greičiu ramiaame vandenyje dėl mažesnio pasipriešinimo. Taip pat dėl mažesnės grimzlės katamaranų plaukiojimo regionas išsiplečia ir į seklesnius vandenius. Lyginant su vienkorpusiu tokių pat parametrų laivu (vandentalpos, grimzlės) katamaranas turi didesnę denio plotą, kas dar daugiau stiprina konkurencingą jo poziciją lyginant su vienkorpusiais laivais.

Didžioji dalis katamaranų yra greitaeigiai ir jų kiekis kiekvienais metais didėja. Daugiausia katamaranų yra keleivinio ir krovininio – keleivinio tipų, kurie pasižymi geromis greitaeigiškumo savybėmis ir aukšta komforto klase – kas ir yra konkurencingiausi jų bruožai lyginant su vienkorpusiais laivais.

Vienas iš didžiausių katamaranų vystymosi tendencijų stabdžių, neskaitant visų privalumų, yra jų išilginis supimasis. Nors skersinis – bortinis supimasis yra daug mažesnis lyginant su vienkorpusiais laivais, tačiau jų išilginis supimasis yra toks pat, o kai kuriais atvejais net blogesnis, nei lyginant su vienkorpusiais laivais. Pakankamai siauri apvadai neslopina išilginio supimosi. Esant tokiam pat ar net didesniai išilginiam supimuisi atsiranda tokios galimos problemos (kai kurie aspektai pritaikomi tik atitinkamam tipui):

- Kuro sąnaudų padidėjimas;
- Laivo greičio sumažėjimas;
- Laivo manevringumo sumažėjimas;
- Korpuso lenkimo ir sukimo momentų padidėjimas, dėl padidėjusių hidrodinaminių – smūginių apkrovų;
- Keleivių kelionės komforto pablogėjimas;
- Krovinio judėjimas kelionės metu;
- Tyrimų laboratorijų ant vandens surinktų duomenų netikslumas ir pan.;

Šios problemos sudaro sąlygas tolimesniam katamaranų tipo laivų tobulinimui – vertikalaus ir horizontalaus supimosi mažinimui ir tyrimams, susijusiems su katamaranų išilginiu supimuosi.

Tyrimo aktualumas:

Katamaranai dėl didesnio denio ploto, geresnių greitaeigiškumo savybių, mažesnio bortinio supimosi yra kur kas pranašesni nei panašios vandentalpos ar dydžio vienkorpusiai laivai. Laivo korpuso gaunamų apkrovų mažinimas, kuro sąnaudų mažinimas, komforto gerinimas, krovinio judėjimo denyje mažinimas ir pan. yra svarbios priežastys, kurios tiesiogiai yra susijusios su išilginiu

laivo supimuosi. Todėl katamaranų išilginio supimosi mažinimas yra vienas aktualiausių tokio korpuso laivų tyrimo objektų, kuriuo siekiama išspręsti ne vieną su juo susijusią problemą.

Tyrimo problematika:

Katamarano išilginis supimasis yra toks pats kaip ir vienkorpusio laivo, o kai kuriais atvejais net ir didesnis. Ši problema mažina katamaranų vystymosi tendencijas, komfortą, ekonomiškumą ir pan.

Darbo tikslas:

Naudojant CFD programinę įrangą ištirti katamarano su povandeniniu sparnu kilinio ir vertikalaus supimosi sąlygas. Gautus rezultatus palyginti su to paties laivo – katamarano be povandeninio sparno supimosi sąlygomis ir nustatyti povandeninio sparno našumą.

Tyrimo objektas:

Klaipėdos universiteto mokslinių tyrimų katamarano tipo laivo – „Mintis“ kilinio ir vertikalaus supimosi tyrimas.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinių darbų analizę;
2. Atskleisti analizuojamos temos problemos sprendimo būdą ir aprašyti slopintuvo konstrukciją;
3. Aprašyti linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizę;
4. Atlikti linijinės laivo išilginio supimosi stabilizavimo teorijos analizę;
5. Apskaičiuoti KU mokslinių – tyrimų laivo su supimosi slopintuvu išilginį supimą naudojant linijinę laivo supimosi teoriją;
6. Apskaičiuoti KU mokslinių – tyrimų laivo su supimosi slopintuvu išilginį supimą naudojant CFD programinę įrangą;
7. Palyginti duomenis ir nustatyti povandeninio sparno našumą.

Skaičiavimo rezultatų bei eksperimentinių laivo supimosi duomenų palyginimas bei analizė atliekant lyginant rezultatus su 2016 metų studento D. Lubio gautais rezultatais, kurie buvo gauti atliekant to paties laivo – KU mokslinių tyrimų laivo – katamarano be povandeninio sparno skaičiavimus.

Tyrimo metodai:

1. Matematinis eksperimentas taikant linijinę laivo supimosi metodiką;
2. Matematinis eksperimentas naudojant CFD programinę įrangą.

MOKSLININKŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Susidomėjimas katamaranais vis didėja, todėl užtikrinti šios kategorijos laivų tobulėjimą yra būtina. Mokslininkai toliau tęsia tyrimus susijusius su katamarano stovumu (kas ir yra didžiausias jų trūkumas) ir būdus kaip jį pagerinti. Išilginio katamarano supimosi mažinimas yra kone labiausiai aktualus šių dienų klausimas susijęs su katamaranų jūrinėmis savybėmis.

Lee C. M., Jones H. D. ir Curphey, R. M. nagrinėja katamarano išilginį supimą ir jo komponentes banguotomis jūrinėmis sąlygomis. Autoriai aprašo slopinimo, prijungtųjų masių koeficientų įtaką išilginiam katamarano supimuisi ir susiejant šiuos parametrus su dažninėmis bangų charakteristikomis. Rezultatai lyginami su sukurto medinio modelio eksperimentiniais duomenimis, kurie buvo gauti modelį testuojant jūrinių savybių tyrimų baseine. Nustatyta teorinių ir eksperimentinių duomenų koreliacija.

D. Zhu ir M. Katory ištyrė katamarano judančio pastoviu greičiu 6 laisvės laipsnių judėjimą. Buvo padarytas katamarano modelis ir atliktas natūrinis eksperimentas. Esmė viso bandymo buvo nustatyti momentus, jėgas ir plaukiančio katamarano judėjimą banguotame vandenyje. Autoriai pasiūlė metodą, kuris įvertina šias charakteristikas. Deja šis metodas nėra patikimas skaičiuojant parametrus greitaeigiams katamaranams.

V. Bertam aprašo jūros bangų tipus ir jūros savybių charakteristikas. Autorius pateikia jūros bangų ir vėjo rezultatus, diagramas, formules susijusias su jų elgsena, sukuriama energija ir kitomis priklausomomis savybėmis reikalingomis jūros sąlygų projektavimui. Taip pat autorius analizuoja metodus, susijusius su skaitiniu laivo stovumo prognozavimu. Bertram V. knygoje analizuojamos laivo korpuso supimasi atstatančiosios, inercinės jėgos, pasipriešinimo jėgos esant nereguliariam bangavimui. Knygoje aprašoma skaičiavimų problematika greitaeigiams laivams naudojant kompiuterines programas, kur siūloma daugiakorpusiams laivams naudoti RSM (response surface methodology [išvertus iš angl. paviršiaus atsako metodika]) ir GFM (green functional method [išvertus iš angl. žaliasis funkcinis metodas]). Pastarasis metodas tinka labiau daugiakorpusiams laivams dėl mažesnės klaidos tikimybės.

M. Davis ir D. Holloway tyrinėjo korpusų geometrines formas plaukiant vienodu 40 kts. greičiu ir esant tai pačiai vandentalpai. Parinktos formos, kurios turi mažiausią pasipriešinimą ir turi geriausią stovumą, tačiau greitaeigiams katamaranams optimalių korpusų formos metodiniai skaičiavimai nebuvo išvesti dėl korpusų sąveikos.

Djačkov V. disertacijoje patikslino ir papildė metodus įvertinant katamaranų korpusų sąveiką, greitaeigiškumo faktorių, prijungtųjų masių, inercinių jėgų dedamąsias, kurios aprašo katamaranų stabilizavimo sąlygas vyraujant reguliariam ir nereguliariam bangavimui. Patikslinti metodai leidžia skaičiuoti platesnį greitaeigių katamaranų variantų diapazoną ir jūrinių savybių charakteristikas,

įvertinant prieš tai minėtus faktorius. Metodika, kurią sukūrė V. Djačkov yra universali skaičiuoti katamaranų išilginį ir vertikalųjį supimasį katamaranams, tačiau eksperimentinis pagrindimas nėra lyginamas su rezultatais gautais sprendžiant kitomis supimosi skaičiuojamosiomis programomis.

Molland, Anthony F., and Turnock, Stephen R. aprašo laivo valdomumo ir stovumo stabilizavimo principus ir mechanizmus. Autoriai apžvelgia povandeninio sparno išilginio supimosi mažinimo formules, povandeninio sparno veikimo principą ir pritaikomumą vienkorpusiems laivams.

Frederick Stern, Jianming Yang ir kt. analizuoja skaičiavimo metodus ir šiuolaikines programas taikomas laivo supimuisi, manevringumui, pasipriešinimui, skęstamumui ir pan. skaičiavimui. Viena iš labiausiai nagrinėjamų programų yra „FLOW 3D“ skaičiuojamoji skysčių dinamika. Aptarti dėsniai ir metodai, kuriais ši programa veikia. Nustatyta, kad sudarius 15 milijonų langelių tinklą vidutinė paklaida gali siekti apie 15 procentų. Tačiau lyginant su kitomis programomis – tai santykinai maža paklaida, todėl rezultatai gaunami pakankamai patikimi.

Y. Terao straipsnyje analizuojamas sukurtas katamarano su povandeniniais priekiniais sparnais dizainas. Šie sparnai pritvirtinti šarnyriais sujungimais prie korpuso ir statmenai į juos primontuotos spyruoklės. Viso eksperimento tikslas buvo sukurti bangomis varomą katamaraną, o tam kad tai padaryti – reikėjo nustatyti jėgų dydžius susidarantį į sparno paviršių katamaranui susiduriant su banga. Analizuojamos veikiančios jėgos, pasipriešinimas į laivo sparną ir korpusą skirtingais plaukimo greičiais (kai $Fr = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25$ ir $0,30$). Atliktas natūrinis eksperimentas. Rezultatai leido įvertinti povandeninio sparno formą ir jėgų veikimą atskiruose sparnuose veikiant šoniniam ir priešpriešiniam bangavimui.

W. Duan ir T. Wu straipsniuose analizuojami vienkorpusių laivų su povandeniniais sparnais valdymo būdai, jėgų komponentės, metodai, kuriais bandoma išgauti maksimalų sparnų efektyvumą ir sumažinti laivo išilginį supimasį. Pateikiami grafikai su gautais rezultatais ir patikslintos formulės kurios leidžia numatyti sumažėjusio išilginio supimosi amplitudę.

D. Lubys moksliniame darbe analizuojamas KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ kilinis ir vertikalus supimasis naudojant Djačkov V. sukurta metodika. Autorius lygina rezultatus skaičiuotus linijine teorija, natūrinio eksperimento rezultatus ir CFD programine įranga gautus rezultatus. Išvadoje pateikta, kad rezultatai naudojant CFD programine įranga yra patikimi, nors skirtumas tarp rezultatų gan žymus. Tačiau tokia išvada pateikta dėl programos veikimo metodikos.

Galima rasti nemažai straipsnių, kuriuose analizuojami vienkorpūs laivai su povandeniniu sparnu ar sparnais, katamaranai ir jų jėgų komponentės bei jų jūrinės savybės. Atliktas ne vienas eksperimentas išilginio supimosi tyrimams ir duomenų analizei. Taip pat atlikta nemažai eksperimentų, povandeninio sparno darbo ir efekto nagrinėjimui. Tačiau dauguma autorių analizuoja ne greitaigius katamaranus, o tik vidutinio greičio. Autorių kurie atlieka greitaigių katamaranų analizę su povandeniniais sparnais, metodikoje trūksta eksperimento pagrindimo. Išnagrinėta, kad

CFD programinė įranga yra pakankamai patikima atlikti išilginio supimosi tyrimo eksperimentinius bandymus. Šia programa būtų galima atlikti ir greitaigio katamarano su povandeniniu sparnu, esant linijinam bangavimui eksperimentą, o rezultatus palyginti su tokiomis pat bangavimo sąlygomis ir su tokio pat laivo, bet be hidrodinaminio stabilizatoriaus bandymo rezultatais. Programa būtų galima nustatyti povandeninio sparno tinkamumą ir efektyvumą.

1. KATAMARANŲ SUPIMOSI PROBLEMOS SPRENDIMAS

2.1. Katamaranų supimosi slopintuvo parinkimas

Laivo stabilumui gerinti ir išilginio supimosi mažinimui būtina naudoti stabilizavimo priemonės. Šios priemonės parenkamos pagal laivo tipą, supimosi pobūdį ir kitus techninius parametrus. Stabilizavimo priemonės skirstomos į dvi grupes: nereikalaujančios investicijų ir reikalaujančios investicijų. Kai kurios stabilizavimo priemonės nereikalaujančios papildomų investicijų:

- Laivo manevravimas, kai keičiamas greitis ir kurso kampas bangų atžvilgiu;
- Krovinių vietos parinkimas ir tvirtinimas, užtikrinant minimalų žalingą krovinio įtaką laivo supimuisi;
- Dar prieš projektuojant laivą, parenkant laivo apvadus ir laivo korpuso formą numatant eksploataavimo sąlygas;

Šios priemonės yra patikimos, tačiau nėra tokios efektyvios ir gali būti taikomos ribotai. Jos dalinai gali padėti išvengiant didelės laivo išilginio supimosi amplitudės. Kitos priemonės reikalauja investicijų – tai papildomų supimosi slopintuvų įrengimas, nors tai ir susieta su laivo svorio didinimu, naudingųjų patalpų mažinimu ir pan. Supimosi slopintuvai gali būti:

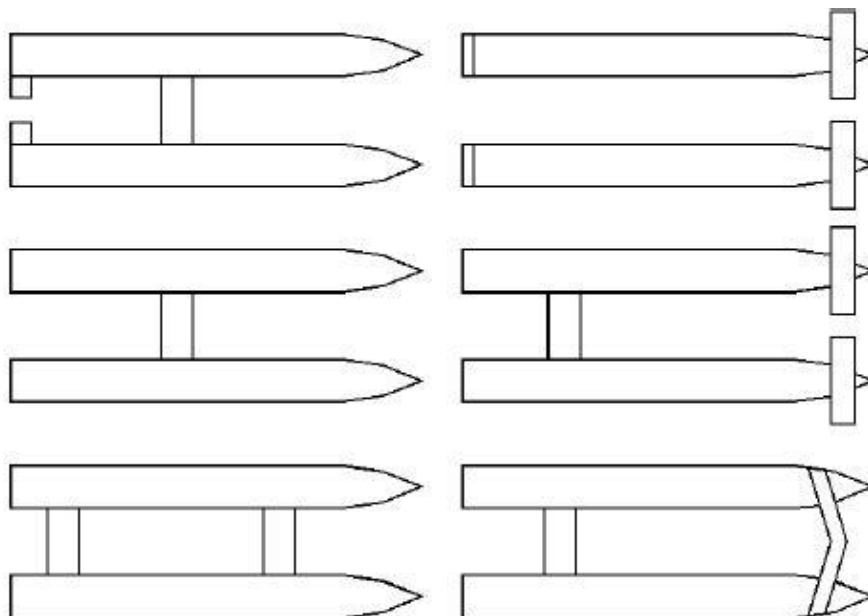
- Gravitaciniai – tai kieti kūnai ir skysčiai judantys laivo korpuso viduje ir keičiantys gravitacijos taško koordinates laivui supantis į priešingą pusę, nei supimosi inercijos kryptis. Didžiausias trūkumas, kad šie mechanizmai užima daug vietos laivo korpuse, todėl nėra labai populiarūs;
- Girokopiniai – girokopinio mechanizmo panaudojimas laivo korpuse. Inercinių jėgų pagalba šis prietaisas balansuoja laivo korpusą horizontalioje plokštumoje. Tačiau tokie prietaisai yra labai brangūs, o efektyvumas didesnis - ryškesnis mažesniems laivams – kateriams, jachtoms ir pan.
- Hidrodinaminiai – tai įvairūs povandeniniai sparnai, kiliai, vairai su automatiniu pasukimu. Šie stabilizatoriai yra patys populiariausi, kadangi neužima vietos korpuso viduje, nėra tokie brangūs kaip prieš tai minėtos alternatyvos, yra patikimi ir dideliems ir mažiems laivams, platesnės panaudojimo galimybės;

Būtent hidrodinaminiai stabilizatoriai ir yra dažniausiai taikomi praktikoje. Povandeniniai sparnai tai atsikišusios geometrinės formos pritvirtintos prie laivo korpuso. Povandeniniai sparnai gali būti naudojami tiek kilinio, vertikalaus, tiek bortinio supimosi mažinimui.

Katamaranuose labai patogu įrengti povandeninius sparnus, kadangi jie jungiasi tarp dviejų korpusų, todėl nėra jokių atsikišusių dalių už korpuso ir visiškai netrukdo švartavimuisi.

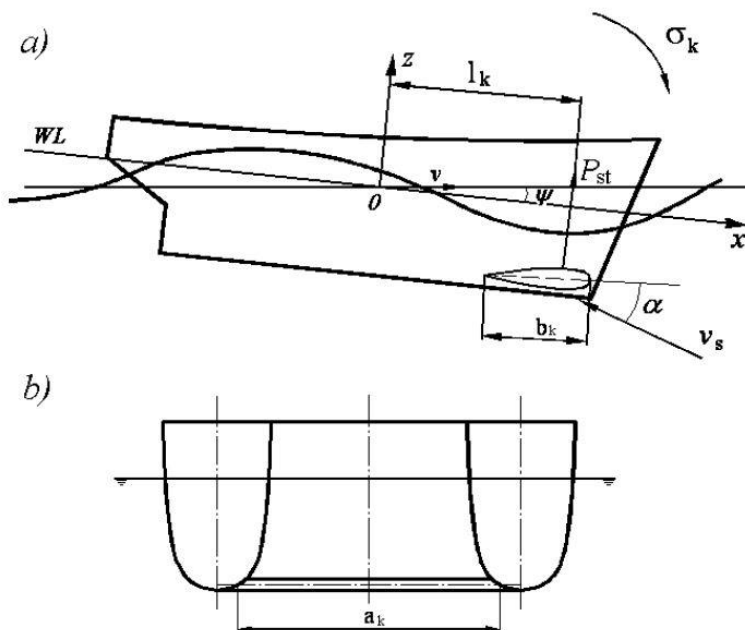
Povandeniniai sparnai gali būti aktyvuojami arba pasyvūs. Aktyvūs nuo pasyvių skiriasi tuo, kad aktyviuose sparnuose yra valdomas jų posvyrio kampas, o pasyvūs yra stacionariai pritvirtinti prie korpuso. Katamaranas gali turėti vieną sparną arba du sparnus priekyje ir gale. Priekinio povandeninio sparno efektyvumas yra didesnis nei esančio gale, todėl kaip kada naudojamas tik vienas sparnas (Djačkov V., 2005).

1 paveiksle pateikiami sparno(-ų) tvirtinimo schemas (Дубровский В. А., 2002):



1. pav. Povandeninio sparno tvirtinimo katamaranui schemas

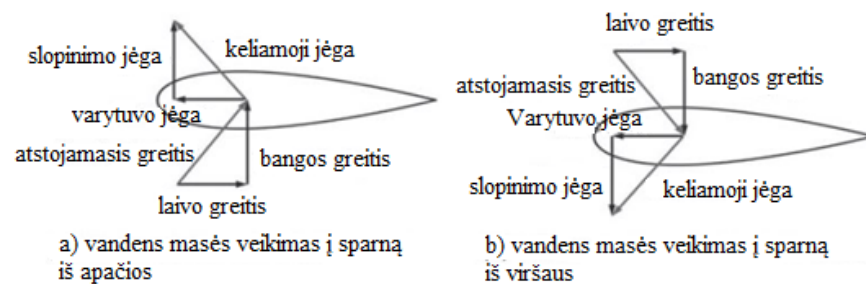
2 pav. parodyta viena iš įmanomų sparno tarp korpusų įrengimo schema ir jo veikimo principas. Katamaranui sparnas tvirtinamas laivo priekyje (Djačkov V., 2005).



2. pav. Katamarano povandeninio sparno tvirtinimo schema: a) iš šono, b) iš priekio

Esant jūros bangavimui laivas supasi dėl hidrodinaminės keliamosios jėgos netolygiai pasiskirsčiusios laivo ilgyje, o supimasis vyksta per korpuso svorio centrą. Norint sumažinti povandeninį supimasi įrengiamas povandeninis sparnas laivo priekyje, kuris vandens slėgio jėgą P_{st} į povandeninį sparną, atakos kampu α , atstumu nuo katamarano svorio centro L_k iki povandeninio sparno, paverčią į stabilizuojantį momentą (2 pav.):

Greičio ir bangos komponentės sukuriančios kėlimo jėgą – stabilizuojantįjį momento petį pavaizduotos 3 paveiksle (Terao Y., Sakagami N., 2015).



3. pav. Laivo supimosi stabilizavimo komponentės bangos pade ir viršūnėje bangos susidūrimo atveju

Slopintuvo efektyvumas priklauso nuo povandeninio sparno, matmenų, formos, tipo, tvirtinimo vietos, katamarano korpuso matmenų, greičio, bangavimo intensyvumo, amplitudės ir pan. Kuo didesnis sparno plotas – tuo didesnė slėgio jėga veikia į sparno paviršių. Povandeninis sparnas sukelia vibracijas, todėl tvirtinamas standžiai tarp katamarano korpusų. Kitu atveju reikia reguliuoti parametrus, nes mažinant sparną – mažėja ir vibracijos, tačiau taip pat mažėja ir sparno efektyvumas. Standus tvirtinimas leidžia didinti katamarano povandeninio sparno plotą, todėl vibracijų įtaka yra labai nežymi arba jos išvis nėra.

2.2.KU mokslinių tyrimų laivo povandeninio sparno projektavimas

Norint nustatyti povandeninio sparno - stabilizatoriaus matmenis, pirmiausia reikia suprasti jo veikimo principą, konstrukciją ir pan. Šie principai aprašomi toliau aprašytomis formulėmis ir paveikslais:

Analizuojamos jėgos ir dydžiai, veikiantys povandeninį sparną:

Stabilizuojantysis momentas. Šis momentas yra jėga, kuri atstato laivą į pradinę (horizontalią) padėtį naudojant povandeninį sparną ir užrašomas taip:

$$M_{st} = l_k \cdot P_{st}, \quad (2.2.1)$$

čia, l_k – atstumas nuo laivo svorio centro iki povandeninio sparno centro (1 pav.) [m];

P_{st} – keliamoji jėga [N];

Slėgio arba keliamoji jėga gali būti išreikšta:

$$P_{st} = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho A v^2, \quad (2.2.2)$$

čia, C_L – išilginis pilnumo koeficientas;

ρ – jūros vandens, kuriame panardintas objektas, tankis. Šiuo atveju tai yra jūros vanduo $\rho = 1025 \text{ kg} / \text{m}^3$

A – projektuojamo sparno projekcijos į plokščiąją dalį plotas [m^2]

v – laivo plaukimo greitis, [m / s]

Atstatantysis išilginis hidrostatinis momentas pagal atakos kampą θ . Pats laivas yra suprojektuotas taip, kad po išorinės jėgos – bangos poveikio ir daugiau to poveikio nepakartojus, laivas grįžtų į pusiausvyros padėtį. Tokiu atveju veikia nuosavas laivo korpuso atstatantysis hidrostatinis momentas:

$$M_{at} = \Delta g G M_L \sin \theta, \quad (2.2.3)$$

čia, Δ – masinė vandentalpa, [t];

g – laisvojo kritimo pagreitis, [m / s^2];

$G M_L$ – metacentrinis aukštis – aukštis nuo laivo svorio centro iki menamo metacentrinio aukščio, kurio paskirtis yra sugražinti laivą į pradinę padėtį po išorinių jėgų poveikio,
[m];

θ – laivo posvyrio kampas, arba vandens slėgio atakos kampas į povandeninį sparną [laipsn.];

Taigi laivo stabilizuojančio momento dydis povandeninio sparno pagalba turi būti toks pat, kaip ir atstatantys išilginis hidrostatinis momentas:

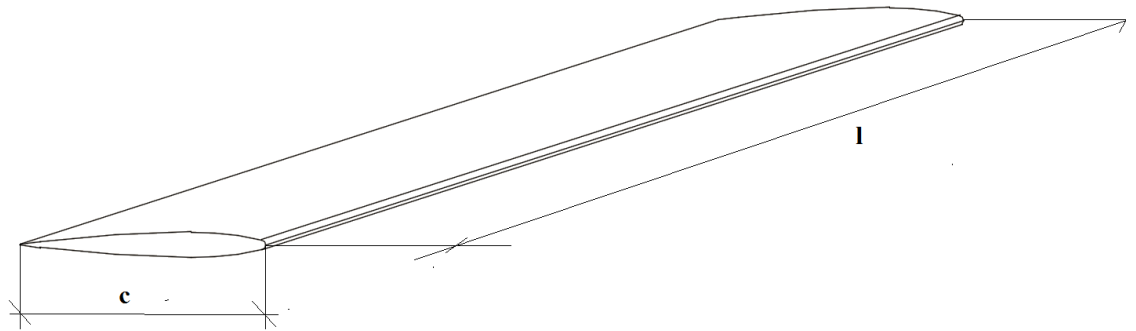
$$M_{at} = M_{st}, \quad (2.2.4)$$

$$l_k \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \rho A v^2 = \Delta g G M_L \sin \theta,$$

Iš čia išreiškiame sparno plotą į kurį veikia keliamoji jėga:

$$A = \frac{2 \Delta g G M_L \sin \theta}{l_k C_L \rho v^2},$$

čia, $A = c \cdot l$ (žr. 4 pav.).



4. pav. Povandeninio sparno eskizas

Povandeninį laivo sparną veikia išskirstyta slėgio į plokštumą jėga p , kuri yra funkcionaliai priklausoma nuo vandens tankio, laivo greičio, laivo korpuso pokrypio, paties sparno pločio ir ilgio.

Išskirstytą jėgą galime paversti atstojamąja jėga per išskirstytos jėgos veikimo centrą, nukreipta ta pačia veikimo kryptimi ir kuri yra lygi:

$$P_{st} = p \cdot l, \quad (2.2.5)$$

Išreiškiame įtempius ir jėgas skirtingose koordinačių plokštumose:

Atstojamosios jėgos:

$$\sum F = 0, \quad (2.2.6)$$

$$P_{st} + R_1 + R_2 = 0,$$

$$P_{st} = -R_1 - R_2,$$

Kadangi įtvirtinimo sąlygos yra tokios pat, o atstumai nuo veikiančios jėgos yra tokie pat, tai:

$$R_A = R_B = -P_{st} / 2,$$

Įtempių reakcijų lygtys:

$$Q_A = R_A = -P_{st} / 2$$

$$Q_B = R_A - P_{st} = -P_{st} / 2 + P_{st} = P_{st} / 2$$

$$Q_C = R_A + P_{st} / 2 = -P_{st} / 2 + P_{st} / 2 = 0$$

Sudaromos lenkimo momentų lygtys jėgų veikimo vietose:

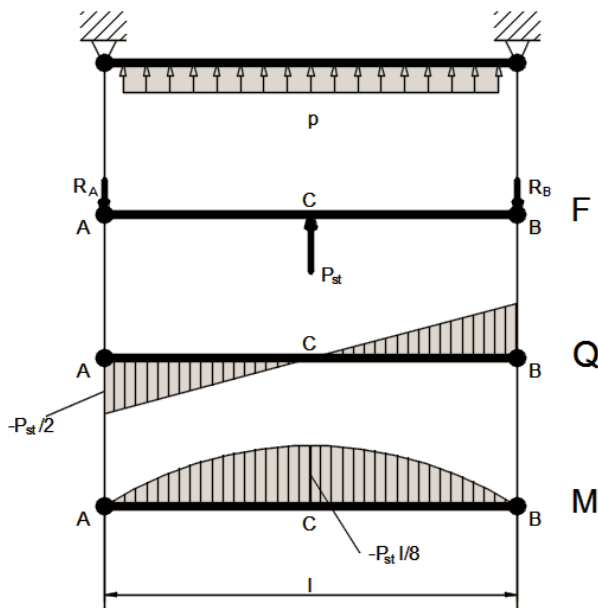
$$\sum M_0 = 0, \quad (2.2.7)$$

$$M_A = 0$$

$$M_B = -R_A \cdot l + P_{st} \cdot l / 2 = 0$$

$$M_C - R_A \cdot l/2 + P_{st}/2 \cdot l/4 = -P_{st}l/4 + P_{st} \cdot l/8 = -P_{st} \cdot l/8$$

Įtempių, lenkimo momentų ir jėgų diagramos pavaizduotos 6 pav. (nubraižyta autoriaus).



5. pav. Povandeninio sparno jėgų, įtempių ir momentų suma

Žinant pagrindines veikiančias jėgas (formules) ir sparno konstrukciją galime užduoti lygtį, kuri turi įvertinti skaičiuojamos konstrukcijos – sparno stiprumą. Ši lygtis užrašoma taip:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{M_{max}}{W_i}, \quad (2.2.8)$$

Ši lygtis aprašo kokių leistinų įtempių σ_{adm} negali viršyti analizuojama konstrukcija, kai žinoma maksimali konstrukciją veikianti jėga – momentas M_{max} ir galime apskaičiuoti lenkimo atsparumo momentą W_i .

6 paveiksle pavaizduotas povandeninio sparno skersinis pjūvis. Matyti, kad sparnas susideda iš 2 elementų:

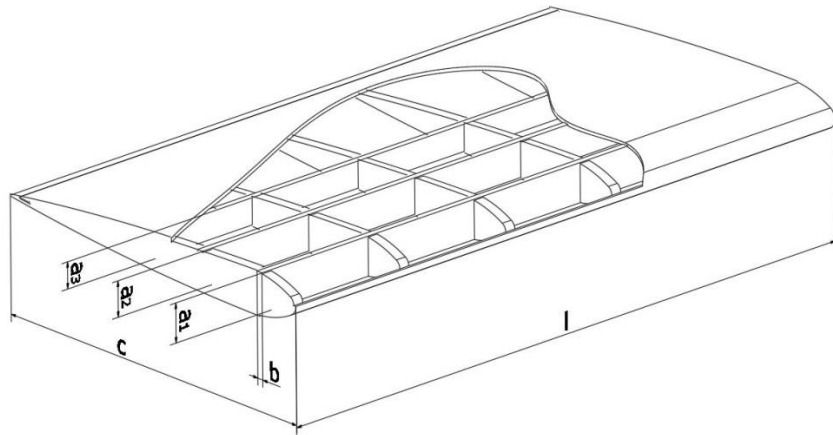
- Stačiakampio pjūvio plokštelių, kurios aprašomos dviem dydžiais a (aukštis) ir b (plotis).

Šios plokštelės atsparumo momentas yra $W_{st} = \frac{b \cdot a^2}{6}$. Tokių plokštelių skaičius gali būti

n -tasis. Priklausomai nuo sparno darbinių sąlygų, dydžio ir pan.

- Sudėtingos lašo formos konstrukcijos, kuri aprašoma d (sienelės storis), c (plotį). Ši konstrukcija yra sudėtinga, todėl suprastiname ją į vieną plokštę, kuri bus

apibūdinama dydžiais $2 \cdot d$ (aukštis) ir c (plotis). Tokios konstrukcijos atsparumo momentas apskaičiuojamas: $W_{laš} = \frac{c \cdot (2d)^2}{6}$



6. pav. Povandeninio sparno pjūvis (nubraižyta autoriaus).

Tada:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{M_C}{(W_{st} + W_{laš})},$$

$$\sigma_{adm} \leq \frac{-P_{st} l}{\left(\frac{b \cdot a^2}{6} + \frac{c \cdot 4d^2}{6} \right)},$$

Jei plokštelių daugiau tada:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{-P_{st} l}{\left(\left(\frac{b \cdot a_1^2}{6} + \frac{b \cdot a_2^2}{6} + \frac{b \cdot a_n^2}{6} \right) + \left(\frac{c \cdot 4d^2}{6} \right) \right)},$$

Žinant – projektuojant dydžius ir sustačius į gautą formulę ir gavus rezultatą, pagal kuria bus galima spręsti konstrukcijos medžiagą pagal jos stiprumą, iš kurios bus konstruojamas sparnas, matmenis, kuriais taip pat galima varijuoti, norint gauti geriausią efektą. Stengiamasi sukurti kuo plonesnį sparną, kadangi kuo plonesnis sparnas – tuo mažesnis pasipriešinimas horizontalia judėjimo kryptimi.

2. TEORINĖ DALIS

3.1. Linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizė

Katamaranai savo konstrukcija yra kur kas sudėtingesni objektai nei vienkorporiniai laivai, todėl juos tyrinėti taip pat yra sudėtingiau, nei vienkorporinius laivus. Tai galima paaiškinti mažiau ištirtais hidrodinaminiais reiškiniais, atsirandančiais dvikorporinių laivų supimosi metu. Kad ją aprašyti būtina išnagrinėti šiuos faktorius:

- Pagrindinius katamarano konstrukcijos elementus;
- horizontalų klirensą;
- papildomas katamaranų charakteristikas.

Šias charakteristikas sudaro jungiamojo tilto išdėstymas pagal korpuso ilgį ir aukštį (vertikalus klirensas), taip pat jo forma (Djačkov V., 2005; cit. pagal Бородай И. К., Невзетаев Ю. А.)

Katamaranų, susidedančių iš dviejų vienodų korpusų, kilinio supimosi analizė atliekama su prielaida, kad inercinės, dempferavimo (jėgos slopinančios laivo supimąsi), atstatomųjų ir sužadinančių jėgų, veikiančių santykinai siaurus katamarano korpusus, esant pakankamam klirenso dydžiui, momentai mažai skiriasi nuo atitinkamų vienkorporinio laivo momentų (kai laivai turi vienodus matmenis ir geometriškai panašius korpuso apvadus).

Katamaranų, kaip ir vienkorporinių tipo laivų, kilinio supimosi diferencialinės lygtys sudaromos ir sprendžiamos kartu su analogiškoms vertikalaus supimosi lygtimis, kurios ir sudarys laivo kilinio supimosi, esant reguliariam bangavimui lygčių sistemą.

Egzistuojančios diferencialinės lygtys (3.1.3 formulė) katamarano kilinio supimosi charakteristikoms skaičiuoti, neatsižvelgiant į jungiamojo tilto, kuris gali liestis su vandeniu, laivo korpusui svyruojant pakankamai didele amplitude, įtaka supimuisei, nedaug skiriasi nuo analogiškų lygčių, aprašančių vienkorporinio laivo kilinį supimąsi.

Iš esančių keleto laivo kilinio supimosi lygčių žymėjimo būdų, mes pasirinktos mokslininko Remezo pasiūlytus lygties žymenis, kurie naudojami visame darbe (Ремез Ю. Б., 1983). Laivo supimąsi sužadinančių jėgų žymėjimas (3.1.1):

$$\left. \frac{A_j^s}{A_j^c} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} a_j \left\{ \begin{matrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{matrix} \right\} dx$$
$$\left. \frac{A_j^{xs}}{A_j^{xc}} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} a_j x \left\{ \begin{matrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{matrix} \right\} dx$$
(3.1.1)

Šios formulės sukurtos tokiu principu: jeigu į pointegralinę funkciją įeina a_j (pagrindinė sužadinosios jėgos dedamoji) tai sužadino jėgos integralas žymimas A_j , jeigu į pointegralinę funkciją įeina $\sin k_1 x$, $\cos k_1 x$, tai integralas A_j viršutiniame indekse žymimas pirmosiomis raidėmis s arba c (A_j^s , A_j^c). Jeigu integralinėje funkcijoje yra daugiklis x (atstumas tarp laivo skaičiuojamojo skerspjuvio ir laivo svorio centro), tai jis taip pat nurodomas viršutiniame indekse (A_j^{xs} , A_j^{xc}).

Šio žymėjimo principus taikysime ir toliau, visame baigiamajame darbe.

Dempferavimo Λ_{ij} , ir prijungtųjų masių M_{ij} koeficientai:

$$\left. \begin{aligned} M_{ij}^s \\ M_{ij}^c \end{aligned} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_k^0 \mu_{ij} \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx, \quad \left. \begin{aligned} \Lambda_{ij}^s \\ \Lambda_{ij}^c \end{aligned} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_k^0 \lambda_{ij} \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx, \quad (3.1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{ij}^{xs} \\ M_{ij}^{xc} \end{aligned} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_k^0 \mu_{ij} x \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx, \quad \left. \begin{aligned} \Lambda_{ij}^{xs} \\ \Lambda_{ij}^{xc} \end{aligned} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_k^0 \lambda_{ij} x \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx,$$

čia, λ_{ij} – tai izoliuoto kontūro Dempferavimo koeficientas, turintis teorinio španhauto formą;

μ_{ij} – izoliuoto kontūro prijungtosios masės koeficientas, priklausantis nuo teorinio španhauto formos;

κ^0 – redukavimo koeficientas.

Pirmiausia nagrinėjant - analizuojant katamarano jūrinės savybes, esant reguliariam bangavimui reikia pradėti nuo vertikalios ir kilinio supimosi lygties, kurią pasiūlė mokslininkas Lugovskij (Луговский В. В., 1999):

$$\begin{cases} a_{33}\ddot{\zeta}_g + b_{33}\dot{\zeta}_g + c_{33}\zeta_g + a_{33}\ddot{\psi} + b_{33}\dot{\psi} + c_{33}\psi = \alpha_3 \cos \sigma_k t + \beta_3 \sin \sigma_k t \\ a_{53}\ddot{\zeta}_g + b_{53}\dot{\zeta}_g + c_{53}\zeta_g + a_{33}\ddot{\psi} + b_{53}\dot{\psi} + c_{53}\psi = \alpha_5 \cos \sigma_k t + \beta_5 \sin \sigma_k t \end{cases} \quad (3.1.3)$$

čia, $\sigma_k = \sigma_0 - kv \cos \varepsilon$ – menamasis bangos dažnis;

σ_0 – ciklinis bangos dažnis;

v – laivo greitis;

ε – kampas tarp bangų sklaidimo ir laivo judėjimo krypties;

ζ_g – laivo svorio centro aplikatė; ψ – laivo kilinio supimosi kampai;

$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, (i, j = 3, 5)$ – prijungtų masių, bei supimosi dempferavimo koeficientai, kurių dydžiai pateikiami 1 lentelėje.

1. lentelė. Supimosi dempferavimo ir prijungtų masių koeficientai

Indeksas	Inercijos jėgos	Dempferavimo jėgos	Atstatomosios jėgos
ij	a_{ij}	b_{ij}	c_{ij}
33	$m + M_{33}$	Λ_{33}	$\rho g S_0$
35	$M_{35} - m x_g$	$\Lambda_{35} + v M_{33}$	$-\rho g S_0 (x_c - x_g) + v \Lambda_{33}$
53	$M_{35} - m x_g I_y$	$\Lambda_{35} - v M_{33}$	$-\rho g S_0 (x_c - x_g) - v \Lambda_{33}$
55	$I_y + M_{55}$	$\Lambda_{55} + v^2 \sigma_0^{-2} \Lambda_{33}$	$\rho g I_y - v^2 M_{33}$

čia, m – laivo masinė vandentalpa;

g – laisvojo kritimo pagreitis ($9,81 \text{ m/s}^2$);

ρ – vandens tankis;

S_0 – laivo konstrukcinės vaterlinijos plotas;

x_g – laivo svorio centro abscisė;

x_c – laivo vandentalpos centro abscisė;

I_y – laivo masės inercijos momentas.

Kiti elementai (Λ_{ij}, M_{ij}) randami pasitelkus plokščiųjų laivo skerspjuvių hipotezę

(Bertram V., 2002; Благовещенский С. Н., 1979):

$M_{33} = \int_{L/2}^{-L/2} \mu_{33}(x) dx$ - prijungtoji laivo vandens masė laivui patiriant vertikalųjį supimą.

$M_{35} = \int_{L/2}^{-L/2} x \mu_{33}(x) dx$ - prijungtosios vandens masės statinis momentas aplink skersinę

svorio centro masę.

$M_{55} = \int_{L/2}^{-L/2} x^2 \mu_{33}(x) dx$ – vandens masės prijungtasis inercijos momentas;

$\Lambda_{33} = \int_{L/2}^{-L/2} \lambda_{33}(x) dx$ – vertikalaus supimosi dempferavimo koeficientas;

$\Lambda_{35} = \int_{L/2}^{-L/2} x \lambda_{33}(x) dx$ – vertikalaus ir kilinio supimosi tarpusavio sąveikos dempferavimo

koeficientas;

$$\Lambda_{55} = \int_{L/2}^{-L/2} x^2 \lambda_{33}(x) dx - \text{kilinio supimosi dempferavimo koeficientas.}$$

čia, $\lambda_{33}(x)$ – vertikalių svyravimų dempferavimo koeficientas;

$\mu_{33}(x)$ – teorinio španhauto vertikalių svyravimų prijungtos masės koeficientas

(Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н., 1969).

Sužadintosios jėgos ir momentai:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= r_0 \left[\rho g A_3^c - \sigma_0 \left(M_{33}^c \sigma_k - \Lambda_{33}^s \right) \right] \\ \beta_3 &= r_0 \left[-\rho g A_3^s + \sigma_0 \left(M_{33}^s \sigma_k + \Lambda_{33}^c \right) \right] \\ \alpha_5 &= r_0 \left\{ -\rho g A_3^{xc} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xc} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xs} - v \left(M_{33}^s + \Lambda_{33}^c \sigma_k^{-1} \right) \right) \right\}, \\ \beta_5 &= r_0 \left\{ \rho g A_3^{xs} - \sigma_0 \left(M_{33}^{xs} \sigma_k + \Lambda_{33}^{xc} - v \left(M_{33}^c - \Lambda_{33}^s \sigma_k^{-1} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

Surašomos pagrindinių dedamųjų lygtys, kurios sudaro sužadinamąsias jėgas:

$$\left. \begin{aligned} A_3^s &= \int_{L/2}^{-L/2} \kappa_3 b_1 \sin k_1 x dx \\ A_3^{xs} &= \int_{L/2}^{-L/2} \kappa_3 x b_1 \sin k_1 x dx \\ A_3^c &= \int_{L/2}^{-L/2} \kappa_3 b_1 \cos k_1 x dx \\ A_3^{xc} &= \int_{L/2}^{-L/2} \kappa_3 x b_1 \cos k_1 x dx \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.5)$$

čia, $b_1 = b - k\omega_f$, kur b – španhauto plotis konstrukcinės vaterlinijos plotyje;

ω_f – panirusio į vandenį španhauto plotas;

$k_1 = k \cos \varepsilon$, kur $k = \frac{2\pi}{\lambda_b}$ – bangos skaičius;

λ_b – bangos ilgis;

κ_3 – redukcijos koeficientas;

x – atstumas tarp laivo skaičiuojamojo skerspjuvio ir jo svorio centro.

Sekančiai užrašomos sužadintų jėgų difrakcinės dempferavimo dedamosios:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{33}^s &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 \lambda_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^{xs} &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 x \lambda_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^c &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 \lambda_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^{xc} &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 x \lambda_{33}(x) \cos k_1 x dx \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.6)$$

Užrašomos sužadintų jėgų difrakcinės inercinės jėgos dedamosios lygtys:

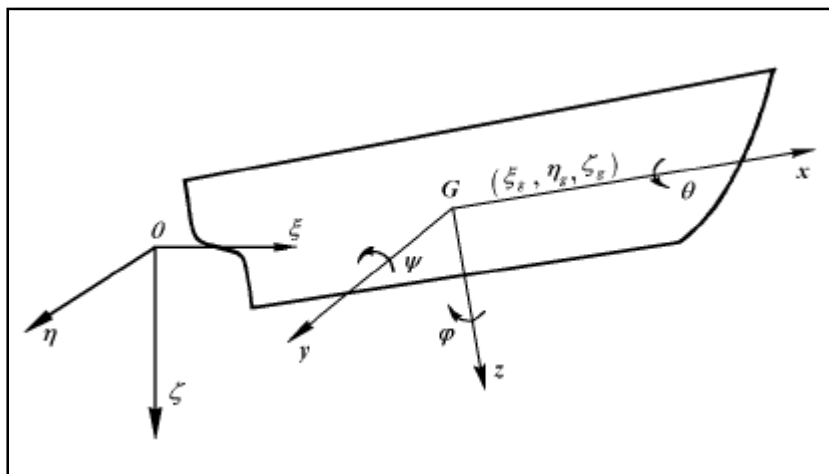
$$\left. \begin{aligned} M_{33}^s &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ M_{33}^{xs} &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 x \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ M_{33}^c &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ M_{33}^{xc} &= \int_{-L/2}^{L/2} \kappa_3^0 x \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.7)$$

Taip surašytomis lygtimis yra patogu tirti katamaranų supimąsį, rezultatai yra pakankamai patikimi ir leidžia išanalizuoti katamarano supimosi pobūdį. Taip pat naudojant šias lygtis galima stebėti – analizuoti katamarano užliejamumo pobūdį ir nustatyti supimosi charakteristikas tiek reguliariam, tiek ir nereguliariam bangavimui (Лыговский В. В., 1999).

Katamarano korpusų hidrodinaminės sąveikos faktorius keičia inercines, dempferavimo, atstatomasias ir sužadinamasias jėgas todėl, vienas iš svarbiausių faktorių, įvertinančių antrojo korpuso įtaką ir papildančių katamarano kilinio supimosi lygtį, yra prijungtosios vandens masės, kuri priklauso nuo santykinio horizontalaus klirenso dydžio. Siekiama įvertinti prijungtosios masės priklausomybę nuo horizontalaus klirenso todėl, įvedamas prijungtosios masės koeficientas. Šis koeficientas parodo, kiek skiriasi dviejų katamarano korpusų prijungtoji masė nuo vieno izoliuoto korpuso prijungtosios masės (Djačkov V., 2005)

3.2. Linijinės laivo išilginio supimosi stabilizavimo teorijos analizė

Laivas kaip ir kiekvienas laisvasis kūnas turi šešis laisvės laipsnius, iš kurių 3 yra linijiniai (vertikalusis, skersinis ir horizontalusis) ir 3 kampiniai arba sukimosi (kilinis, bortinis ir vingiavimas). Linijiniai judesiai atvaizduojami sutampa su koordinačių ašimis (x, y, z), o sukimosi judesiai – aplink jas (7 pav.).



7. pav. Laivo svyravimų dedamosios

Jūroje judantis laivas vienu metu yra veikiamas daugybės faktorių (bangos, srovės, vėjo ir pan.). Kiekvienas laisvės laipsnio judesys yra įtakojamas kito laisvės laipsnio judesio laivo judėjimo vandenyje metu. Laivo judesio analizės sumetimais, galima sudaryti lygtis vienam laisvės laipsnio judesiui ir priimti, kad kiti judesiai jam nedaro papildomos įtakos.

Analizuojant laivo judėjimą praktikoje, kai laivas yra pusiausvyros padėtyje, koordinačių ašių pradžios taškas yra sutapatinamas su laivo svorio centru, o ašys – su laivo linijiniais judesiais. Laivo judėjimą charakterizuoja šie dydžiai:

- ξ – linijinis svyravimas išilginės ašies kryptimi – horizontalusis – išilginis judėjimas;
- η – linijinis svyravimas skersinės ašies kryptimi – horizontalusis – skersinis judėjimas;
- ζ – linijinis svyravimas vertikalsiosios ašies kryptimi – vertikalusis judėjimas, arba vertikalusis supimasis;
- θ – kampinis svyravimas aplink išilginę ašį – bortinis (šoninis) supimasis;
- ψ – kampinis svyravimas aplink skersinę ašį – kilinis supimasis;
- φ – kampinis svyravimas aplink vertikaliąją ašį – vingiavimas.

Tiriant laivo išilginius svyravimus, galima taikyti pagrindines bendrosios tiesinės laivo supimosi teorijos taisykles bei teiginius, kai laivas juda statmenai bangoms (bangų sklaidimo kryptis į laivapriekį).

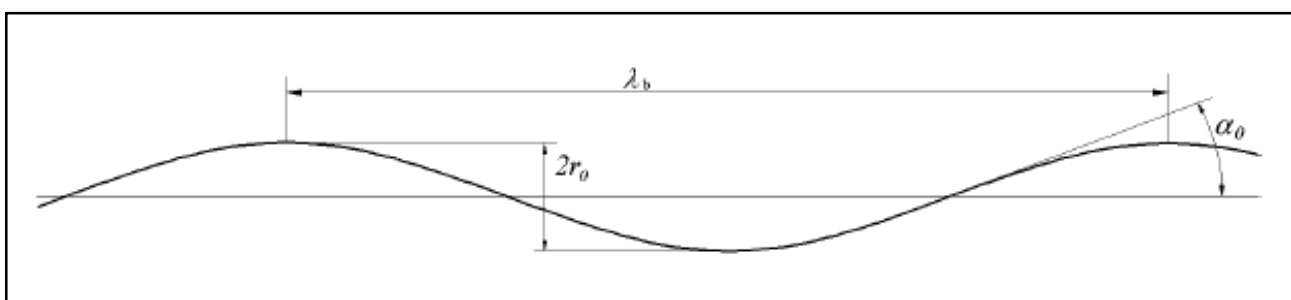
Išilginį supimasi sudaro vertikalusis, kilinis ir horizontalusis supimasis. Laivo išilginio supimosi teorijoje įprastai nagrinėjami tik vertikalusis ir kilinis supimasis, nes jie glaudžiai tarpusavyje susiję ir daro įtaką vienas kitam. Mažiausiai įtakos išilginiam supimuisi, lyginant su kitais dviem, turi horizontalusis – išilginis supimasis. Dažnai horizontalaus supimosi sudaromi jėgos

momentai laikomi nereikšmingai maži, lyginant su vertikaliuoju ir kiliniu supimusi, todėl nenagrinėjami (Djackov V., 2005; cit. pagal Лыговский В. В. 1999).

Pagrindinis laivo supimosi žadinimo šaltinis yra bangos ir vėjas. Taikant tiesinį laivo supimosi metodą nagrinėjamas laivo supimasis esant reguliariam – pastoviam bangavimui. Reguliarus bangavimas vyksta tada, kai bangos aukštis, dažnis, ilgis yra vienodi bet kuriame laiko periode - cikliškas. Todėl bendrai laivo supimasis yra apibūdinamas, kaip supimasis sužadintame jūros paviršiuje, kuris susideda iš plokščių, progresinių, mažų amplitudžių bangų.

Bangos charakteristikas apibūdina šie dydžiai:

- Bangos aukštis (dviguba amplitudė) – tai atstumas nuo bangos viršūnės iki bangos pado. Ją apibūdina formulė $h_b = 2r_0$, kai $r_0 \approx 0,085\lambda_b^{0,75}$ (žr. 8 pav.).
- Bangos ilgis λ_b – tai atstumas tarp dviejų bangos viršūnių, arba bangos padas. (žr. 8 pav.).
- Bangos periodas $\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda_b$ – tai laikotarpis tarp dviejų nuosekliai judančių bangos viršūnių;
- Bangos profilio greitis $c = \frac{\lambda_b}{\tau}$ – tai atstumas per kurį laiko vienetą perkeliama bangos viršūnė;
- Didžiausias bangos šlaito kampas α_0 – tai didžiausias kampas, kurį sudaro bangos liestinė su horizontu (žr. 8 pav.);
- Bangos statumas $\frac{2r_0}{\lambda_b}$ charakterizuoja bangos aukščio ir ilgio santykis. Jei santykinai bangos aukštis yra labai didelis lyginant su bangos ilgiu – tokios bangos suyra.



8. pav. Reguliarios bangos profilis, bei jo dedamosios (Djačkov V., 2005)

Skaičiuojant katamarano kilinį ir vertikaliųjų supimąsi, pagrindą sudaro vieno korpuso geometriniai duomenys. Dydžiai, priklausantys visam katamaranui, pateikiami 2 kartus mažesni, o

korpusų hidrodinaminės sąveikos ypatybės lygtyse atspindi, kaip jėgų, veikiančių katamaraną, papildymas.

Katamaranų ir vienkorpusių laivų supimosi charakteristikų pagrindiniai skirtumai nusakomi šiais dydžiais:

- pagrindinių matmenų santykiais;
- laivo korpuso apvadų forma;
- apkrovų pasiskirstymu išilgai laivo korpuso;
- korpusų skaičiumi, bei jų išdėstymu vienas kito atžvilgiu.

Paprastai jūriniai katamaranai labai skiriasi nuo vienkorpusių laivų, lyginant jų gabaritinių matmenų santykius:

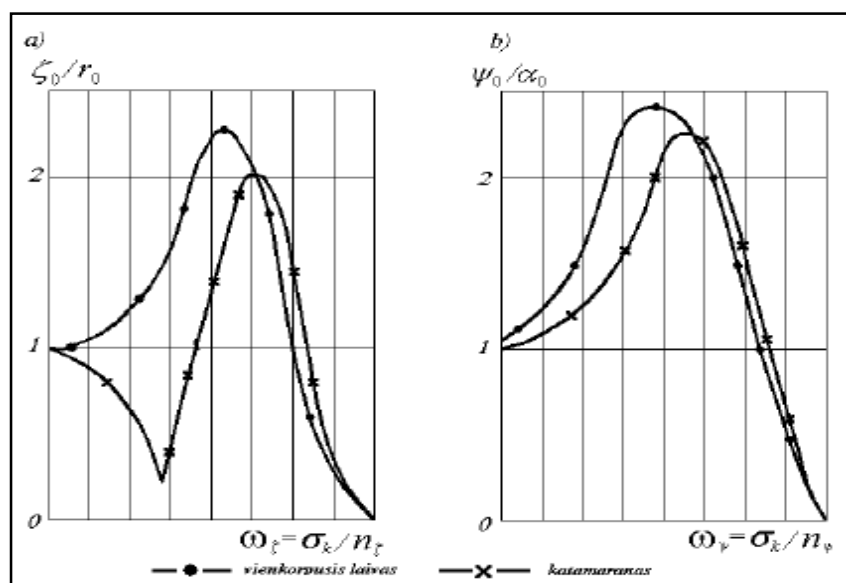
- Santykinis denio plotis (katamaranas $L/B = 1 \div 5$, vienkorpusio laivo $L/B = 2,5 \div 11$);
- Santykinai mažesnis korpuso plotis (katamarano $B_1/d = 2 \div 0,2$, didžiosios daugumos vienkorpusių laivų $B_1/d = 2 \div 4$);
- Santykinai didesnis borto aukštis (katamarano $L/D = 0,1 \div 0,3$, vienkorpusio laivo $L/D = 0,05 \div 0,15$).

Kai katamarano ir vienkorpusio laivo vandentalpos, ilgis ir korpusų apvadų formos yra vienodos, katamarano metacentrinis spindulys, bei inercijos momentas skersinės ašies atžvilgiu yra šiek tiek mažesnis negu vienkorpusio laivo. Todėl laisvojo kilinio ir vertikalaus supimosi dažniai yra labai artimi vienas kitam, tačiau neretai katamaranų supimosi dažniai yra šiek tik didesni (Djackov V., 2005).

9 paveiksle yra pateikiami standartiniai katamarano ir vienkorpusio laivo vertikalaus ir kilinio supimosi amplitudiniai – dažniai, kai abiejų laivų vandentalpos yra vienodos.

Didžiausi svyravimų skirtumai lyginant vienkorpūsius ir dvikorpūsius laivus atsiranda tada kai katamaranas yra greitaigis ($Fr > 0,3$). Kai greičiai yra nedideli tiek katamarano, tiek vienkorpusio laivo supimosi grafikai yra labai panašūs. Taip pat laivų su tradiciniais apvadais kilinio supimosi grafikai beveik nesiskiria laivams plaukiant prieš ar bangos judėjimo kryptimi. Tačiau aukštų supimosi dažnių diapazone katamaranams gali pasireikšti „rezonansinis“ supimas.

Tačiau gali būti ir taip, jog katamarano kilinio supimosi charakteristikos gali būti ir blogesnės nei vienkorpusio laivo. Taip gali būti, jeigu katamarano korpusas yra ilgesnis ir gana ištęstas.



9. pav. Katamaranų ir vienkorpusių laivų, esant vienodiems korpusų ilgiams ir vienodoms vandentalpoms, amplitudinių – dažnių palyginimas: a – vertikalus supimasis prieš bangas; b – kilinis supimasis esant palydimojo bangavimo sąlygoms (Djačkov V., 2005).

Pirmiausia turi būti įvertinta katamarano korpuso sąveika tarpusavyje ir šios sąveikos įtaka – poveikis laivo supimuisi. Kad tai atlikti naudojamas L. Sedovo skaičiavimo metodas apie necirkuliarinį dviejų plokštelių-tandemo judėjimą ant nesvaraus skysčio paviršiaus, kuri leidžia įvertinti klirseno poveikį laivo supimuisi, įtraukiant korpusų tarpusavio sąveikos faktorius į kilinio supimosi lygtis. Pagal šią metodiką laivas yra pakeičiamas plokštelių pora, judančia nevysiškai ramaus skysčio paviršiumi (Djackov V., 2005; Cit. pagal Седов Л. И., 1980) Šiuo atveju prijungtoji masė plokštelėms judant bus lygi:

$$\mu_y = \frac{\pi\rho}{2} B^2 (1 + 2\bar{C})^2 \left[1 - 2 \frac{E(k)}{F(k)} \right], \quad (3.2.1)$$

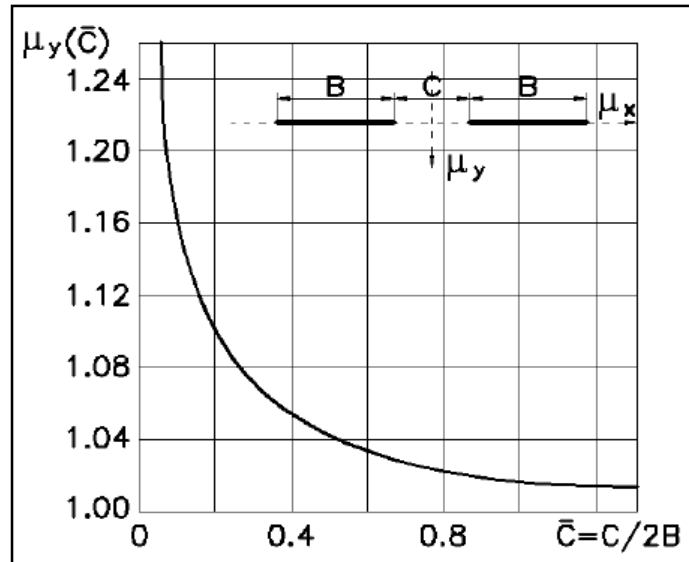
čia, $F(k)$ ir $E(k)$ – pirmosios ir antrosios eilės pilnasis elipsinis integralas.

$$k = \frac{1}{2 + 2\bar{C}}, \quad (3.2.2)$$

Iš santykio – dviejų plokštelių prijungtosios masės ir vienos plokštelės dvigubos prijungtosios masės – gausime koeficientą, nustatanti klirseno įtaka plokštelių-tandemo prijungtajai masei:

$$\mu_y(\bar{C}) = (1 + 2\bar{C})^2 \left[1 - 2 \frac{E(k)}{F(k)} \right], \quad (3.2.3)$$

Prijungtosios masės koeficiento priklausomybė nuo horizontalaus katamarano klirenso reikšmę galima nustatyti iš grafiko (žr. 10 pav.)



10. pav. Prijungtosios masės koeficiento priklausomybė nuo horizontalaus katamarano klirenso (Алферев М. Я., Мадорский Г.С., 1976)

Naudojant šį grafiką galima nustatyti prijungtosios masės koeficiento reikšmę atsižvelgiant į santykinį horizontalų klirenso ir įtraukiant į išilginio supimosi lygtis patikslinti katamarano supimosi skaičiavimo rezultatus, įvertinant horizontalaus klirenso įtaką katamarano išilginio supimosi charakteristikoms. Su koeficiento pagalba įvertiname, kiek skiriasi dviejų katamarano korpusų prijungtoji masė nuo vieno izoliuoto korpuso prijungtosios masės. (Djačkov V., 2005).

V. Djačkov disertacijoje panaudoji prijungtosios masės koeficientai, į kuriuos įtraukė katamarano supimosi lygtis ir santykinio horizontalaus klirenso priklausomybės grafikus. Šie koeficientai rasti pasitelkus plokščių laivo skerspjuvių teoriją.

$$M_{33} = \mu_y(\bar{C}) \int_{L/2}^{-L/2} \mu_{33}(x) dx - \text{prijungtosios vandens masės esant vertikaliam supimuisi};$$

$$M_{35} = \mu_y(\bar{C}) \int_{L/2}^{-L/2} x \mu_{33}(x) dx - \text{prijungtosios masės statinis momentas skersinės svorio centro}$$

ašies atžvilgiu.

$$M_{55} = \mu_y(\bar{C}) \int_{L/2}^{-L/2} x^2 \mu_{33}(x) dx - \text{prijungtosios vandens masės inercijos momentas.}$$

Koeficientas $\mu_y(C)$ skirtas katamaranų supimosi lygčių tikslinimui, o išvestinėmis lygtimis tiksliau apskaičiuojamos daugiakorpusių laivų jūrinių savybių charakteristikos. Skaičiavimai atliekami atsižvelgiant į korpusų tarpusavio sąveikas.

Supimosi dempferavimo koeficientai apskaičiuojami pagal formules, pateiktas (3.1) skyriuje:

- Sužadinamosios jėgos ir momentai randami pagal (3.1.4) formulę.
- Sužadinamųjų jėgų pagrindinės dalies koeficientai apskaičiuojami pagal (3.1.5) formulę.
- Sužadinamųjų jėgų supimosi slopinimo difrakcinių komponentų koeficientai – pagal (3.1.6) formulę.

Turėdami $\mu_y(C)$ koeficientą, statome jį į (3.1.7) formulę ir perskaičiuojame sužadintų jėgų difrakcinės inercinės jėgos dedamąsias:

$$\left. \begin{aligned} M_{33}^c &= \mu_y(\bar{C}) \int_{-L/2}^{L/2} k_3^0 \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ M_{33}^x &= \mu_y(\bar{C}) \int_{-L/2}^{L/2} k_3^0 \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ M_{33}^{xc} &= \mu_y(\bar{C}) \int_{-L/2}^{L/2} k_3^0 x \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ M_{33}^{xx} &= \mu_y(\bar{C}) \int_{-L/2}^{L/2} k_3^0 x \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \end{aligned} \right\}, \quad (3.2.4)$$

Į (3.1.3) lygtį įtraukus visus komponentus, gausime naujas katamarano judėjimo diferencialines lygtis (žr. 3.2.5 lygtį) laivui patiriant kilinį supimąsi, kai laivo judėjimo greitis – v m/s.

$$\begin{aligned} & (m + M_{33}) \ddot{\zeta}_g + \Lambda_{33} \dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g + (M_{35} - m x_g) \ddot{\eta} + \\ & + (\Lambda_{35} + v M_{33}) \dot{\eta} + (-\rho g S_0 x_f + v \Lambda_{33}) \eta = \\ & = r_0 (\rho g A_3^c - \sigma_0 (M_{33}^c \sigma_k - \Lambda_{33}^s)) \cos \sigma_k t + \\ & + r_0 (-\rho s A_3^s + \sigma_0 (M_{33}^s \sigma_k + \Lambda_{33}^c)) \sin \sigma_k t; \\ & (M_{35} - m x_g) \ddot{\zeta}_g + (\Lambda_{35} - v M_{33}) \dot{\zeta}_g + (-\rho g S_0 x_f - v \Lambda_{33}) \zeta_g + \\ & + (I_y + M_{55}) \ddot{\eta} + \left(\Lambda_{55} + \frac{v^2}{\sigma_0^2} \Lambda_{33} \right) \dot{\eta} + (\rho g I_y - v^2 M_{33}) \eta = \\ & = r_0 \left(-\rho g A_3^{xc} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xc} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xs} - \left(M_{33}^s + \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \right) \cos \sigma_k t + \\ & + r_0 \left(-\rho s A_3^{xs} - \sigma_0 \left(M_{33}^{xs} \sigma_k + \Lambda_{33}^{xc} - \left(M_{33}^c - \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \right) \sin \sigma_k t; \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

čia, M_{33} - prijungtos vandens masės esant vertikaliai supimuisi;

M_{35} - prijungtos masės inercijos momentas skersinės svorio;

M_{55} - prijungtos vandens masės inercijos momentas;

$M_{33}^c; M_{33}^s; M_{33}^{xc}; M_{33}^{xs}$ - patikslinti sužadintų jėgų, inercinių difrakcinių jėgų komponentų koeficientai.

Laivams, kurie turi du ar daugiau korpusais, judančių santykinai dideliais greičiais ($Fr > 0,3$) būtina patikslinti judėjimo lygčių komponentus. papildomų jėgų ir momentų, esant kiliniam supimuisi lygtis, kurios sudaromos atsižvelgiant į šias išvestines:

$$\begin{aligned} dC_z / d\alpha &= C_z^\alpha \\ dC_m / d\alpha &= C_m^\alpha \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

Į katamarano judėjimo lygtis taip pat įtraukiame ir slėgio centro koeficientą C_d . (Алферьев М. Я., Мадорский Г.С., 1976).

$$\begin{aligned} \Delta P &= \rho v^2 S_0 (1 - \sin \beta_k) \left(-C_z^\alpha \psi + \frac{C_d L}{2v} C_z^\alpha \dot{\psi} + \frac{1}{v} C_z^\alpha \dot{\zeta}_g \right) \\ \Delta m &= 0,5 \rho v^2 S_0 L (1 - \sin \beta_k) \left(-C_m^\alpha \psi + \frac{C_d L}{2v} C_m^\alpha \dot{\psi} + \frac{1}{v} C_m^\alpha \dot{\zeta}_g \right) \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

čia, C_z^α - keliamosios jėgos koeficientas, kuris yra nustatomas pagal grafiką (žr. 12 pav.) atsižvelgiant į santykį L/B ir Frudo skaičių (Fr).

C_m^α – momento koeficiento išvestinė pagal atakos kampą, nustatomą pagal grafiką (žr. 13 pav.), šio koeficiento reikšmė taip pat priklauso nuo L/B santykio ir Frudo skaičiaus; C_d – slėgio centro koeficientas, nustatomas grafiškai (žr. 8 pav.), nustatomas atsižvelgiant į L/B ir Frudo skaičių;

L – laivo korpuso ilgis tarp laivapriekinio ir laivagalinio statmenų [m];

B – vienos pusės katamarano korpuso plotis [m];

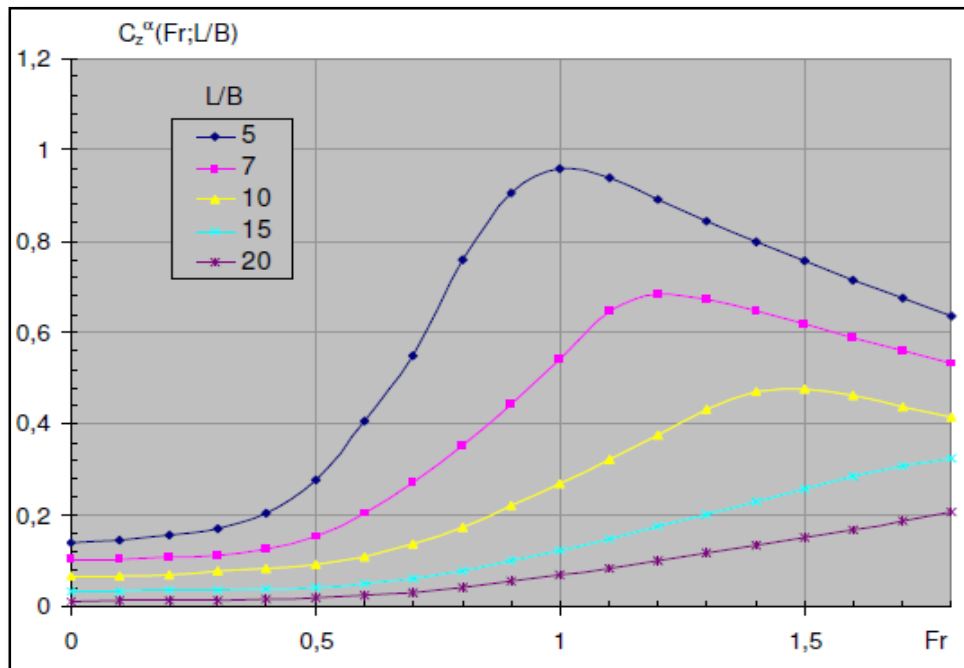
Fr – Frudo skaičius apskaičiuojamas pagal formulę: $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$

β_k – vidutinis katamarano korpuso kiliškumo kampas, kuris randamas pagal (3.2.8) formulę.

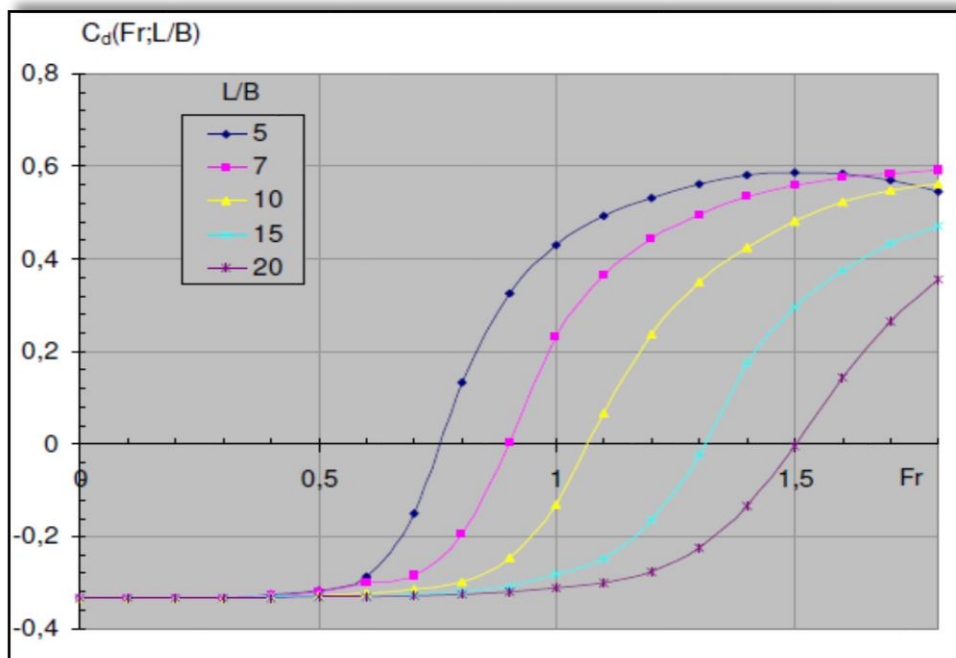
$$\beta_k = \frac{\beta_1 B_1 + \beta_5 B_5 + \beta_{10} B_{10} + \beta_{15} B_{15} + \beta_{19} B_{19}}{B_1 + B_5 + B_{10} + B_{15} + B_{19}}, \quad (3.2.8)$$

kai, β_i, B_i – kiliškumo kampas ir španhauto plotis pagal i – tojo španhauto vaterliniją.

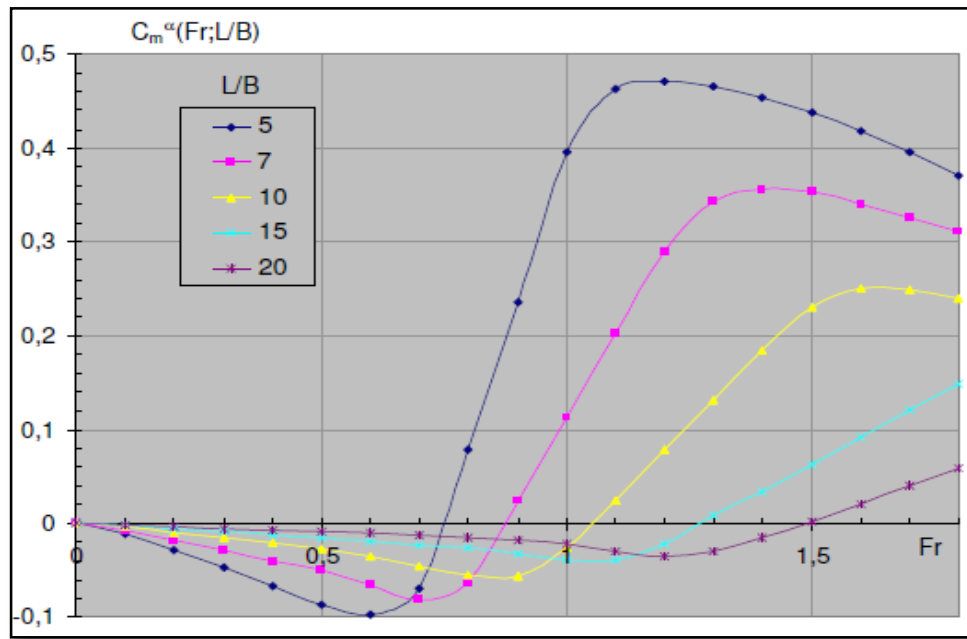
Išvestinių nustatymo grafikai pavaizduoti 11, 12, 13 paveiksluose (Djačkov V., 2005)



11. pav. Išvestinės $C^\alpha = dC_z/d\alpha$ nustatymui naudojamas grafikas.



12. pav. Slėgio centro koeficiento C_d nustatymui naudojamas grafikas



13. pav. Išvestinėi $C_m^\alpha = dC/d\alpha$ nustatymui naudojamas grafikas

V. Djačkov daktaro disertacijoje panaudota papildomų masių ir momentų lygtis, kurias jis įtraukia į katamarano kilinio supimosi lygtis. Koeficientai C_z , C_m , C_d , randami iš grafikų, taip pat prisideda prie patikslintų katamaranų kilinio supimosi lygčių. Šios lygtys sudaro pagrindą tolimesniems katamaranų kilinio ir vertikalaus supimosi tyrimams (Djačkov V., 2005).

Pasinaudoję žemiau esančios lygties dedamosiomis ir įtraukę jas į (3.1.2) formulę, užrašysime katamarano kilinio supimosi diferencialines lygtis, leidžiančias įvertinti pataisas, kai laivo greitis $Fr > 0,3$. Patikslintose katamarano kilinio supimosi lygtyse (3.2.10) atsižvelgiama į šias pataisas:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{33}^z &= \rho v S_0 (1 - \sin \beta_k) C_z^\alpha \\ \lambda_{35}^z &= \rho v S_0 (1 - \sin \beta_k) \frac{C_d L}{2} C_z^\alpha \\ \lambda_{35}^m &= \rho v S_0 (1 - \sin \beta_k) \frac{L}{2} C_m^\alpha \\ \lambda_{55}^m &= \rho v S_0 (1 - \sin \beta_k) \frac{C_d L^2}{4} C_m^\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (3.2.9)$$

Patikslintose lygtyse (3.2.10), įtrauktos katamarano greitaeigiškumo pataisos, kurios leidžia tiksliau spręsti katamaranų supimosi uždavinius esant reguliariam bangavimui, kai Frudo skaičius $Fr > 0,3$. Šias lygtis galima laikyti universaliomis, nes greitaeigiškumo pataisa daugiausia priklauso nuo laivo eigos greičio. Esant mažiems eigos greičiams pataisos bus per mažos, kad turėtų reikšmingesnės įtakos katamaranų supimosi charakteristikoms. Lygties komponentėmis ir pataisomis papildyta formulė (3.2.10) užrašoma taip (Djačkov V., 2005):

$$\begin{aligned}
& (m + M_{33})\ddot{\zeta}_g + (\Lambda_{33} + \lambda_{33}^z)\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g + (M_{35} - m x_g)\ddot{\eta} + \\
& + (\Lambda_{35} + \lambda_{35}^z + v M_{33})\dot{\eta} + (-\rho g S_0 x_f + v \Lambda_{33} - \lambda_{33}^z)\eta = \\
& = r_0 (\rho g A_3^c - \sigma_0 (M_{33}^c \sigma_k - \Lambda_{33}^s)) \cos \sigma_k t + \\
& + r_0 (-\rho s A_3^s + \sigma_0 (M_{33}^s \sigma_k + \Lambda_{33}^c)) \sin \sigma_k t; \\
& (M_{35} - m x_g)\ddot{\zeta}_g + (\Lambda_{35} + \lambda_{35}^m - v M_{33})\dot{\zeta}_g + (-\rho g S_0 x_f - v \Lambda_{33})\dot{\zeta}_g + \\
& + (I_y + M_{55})\ddot{\eta} + \left(\Lambda_{55} + \frac{v^2}{\sigma_0^2} \Lambda_{33} + \lambda_{55}^m \right) \dot{\eta} + (\rho g I_y - v^2 M_{33} - \lambda_{35}^m) \eta = \\
& = r_0 \left(-\rho g A_3^{xc} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xc} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xs} - \left(M_{33}^s + \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \right) \cos \sigma_k t + \\
& + r_0 \left(-\rho s A_3^{xs} - \sigma_0 (M_{33}^{xs} \sigma_k + \Lambda_{33}^{xc}) - \left(M_{33}^c - \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \sin \sigma_k t;
\end{aligned} \tag{3.2.10}$$

čia, $\lambda_{33}^z; \lambda_{35}^z; \lambda_{35}^m; \lambda_{55}^m$ - įtrauktos papildomos greitaiegiškumo pataisos.

λ_{33}^z - dinaminės jėgos papildomos dempferavimo koeficientas nuo vertikalios supimosi;

λ_{35}^z - dinaminės jėgos papildomos dempferavimo koeficientas nuo vertikalios ir kilinio supimosi;

λ_{35}^m - dinaminio momento papildomos dempferavimo koeficientas nuo vertikalios ir kilinio supimosi;

λ_{55}^m - dinaminio momento papildomos dempferavimo koeficientas nuo kilinio supimosi;

Šiame skyriuje išanalizuota, kad išilginis supimas sudarytas iš kilino, vertikalios ir horizontalios supimosi sudedamųjų. Nustatyta, kad horizontalus supimas, palyginus su kitais dviem, yra toks mažas, kad skaičiavimuose, net nevertinamas. Atlikta bangos analizė ir parodytos jos komponentės – kuriomis sudaromos jūrinės sąlygos išilginio supimosi nagrinėjimui. Surašytos Djačkov V. vandens prijungtosiomis masėmis, sužadinamosiomis jėgomis ir dempferavimo koeficientais papildytos kilinio ir vertikalios supimosi lygtys, kurios leidžia tiksliau apskaičiuoti katamarano vertikalųjį ir kilinį supimą. Šios universalios lygtys tinkamos analizuoti vertikalųjį ir kilinį supimą esant reguliariam – cikliniam bangavimui arba kitaip linijine išilginio supimosi teorija.

4. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS

4.1 KU mokslinių tyrimų laivo supimosi skaičiavimai pagal linijines laivo išilginio supimosi teorijos metodiką

4.1.1 Supimosi skaičiavimo kompiuterinės programos aprašymas – metodika.

Skaičiuojant katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi charakteristikos naudojama kompiuterinė programa, kuri sudaryta naudojantis patikslintomis lygtimis, kurias aptarėme 3 skyriuje ir skaičiavimo algoritmu, kurį sudarė Djačkov V. Programoje sudedamosios hidrodinaminės jėgos, kurios veikia laivą, apskaičiuojamos pagal skerspjūvių hipotezę (Bertram V., 2002).

Norint atlikti skaičiavimus reikia sudaryti skaičiavimo užduotį:

1. Surašyti laivo charakteristikas:

- nustatyti laivo tipą (vienkorpusis arba katamaranas)
- parinkti ar laivas yra su supimosi stabilizatoriais (jei laivas stabilizuojamas reikia nustatyti stabilizatorių išdėstymo schemą, bei jų tipą); Stabilizatoriaus dydis nustatomas priartėjimo metodu.
- Taip pat skaičiuojant reikia įtraukti papildomus laivo duomenis: španhautų skerspjūvių pločius, jų grimzlę ir plotą, paties laivo korpuso ilgį, plotį, grimzlę, borto aukštį, greitaeigiškumą ir kt.

2. Surašyti sąlygas, kuriomis laivas dirbs:

- Reikia aprašyti bangų ilgius, pagal kuriuos bus apskaičiuojamos supimosi charakteristikos: laivo kilinio ir vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos,
- Sudaryti supimosi parametrų ir laivo poslinkių parametrų grafikus. Į grafikus įtraukus skaičiuojamojo laivo korpuso kontūro koordinates, galima pamatyti laivo supimosi pobūdį bangose įvairiais laiko momentais, taip pat gauti galimo laivo denio užliejimo grafiką.

4.1.2 Tiriamojo objekto – Klaipėdos universiteto mokslinio tyrimų laivo „Mintis“ aprašymas

Klaipėdos Universiteto mokslinių tyrimų laivas, tai specialios paskirties daugiavandinis laivas, kurio paskirtis – visų pagrindinių okeanografinių, ekologinių, geologinių ir biologinių fizikinių – cheminių tyrimų atlikimas Baltijos jūroje ir kituose vandenyse. 18 paveiksle KU mokslinių tyrimų laivo nuotrauka.



14. pav. Klaipėdos universiteto mokslinių tyrimų laivas „Mintis“.

Funkcijos, kurias atlieka KU mokslinių tyrimų laivas:

- vandens baseinų gylių matavimas ir dugno morfologijos nustatymas;
- dugno paviršiaus inventorizacija, nuskendusio objektų identifikavimas ir apskaita;
- seismo – akustiniai jūros dugno tyrimai, identifikuojant po nuosėdomis palaidotus objektus bei nustatant giluminę dugno struktūrą iki 20 – 30 metrų po vandens telkinio dugno paviršiumi;
- vandens baseinų dugno mėginių paėmimas;
- vandens stovymės monitoringas
- gruntų stipruminių savybių tyrimai;
- gręžinių kabotažas;
- struktūriniai žemės gelmių tyrimai;
- naudingų iškasenų jūroje ir kranto zonoje paieškos;
- struktūriniai žemės gelmių tyrimai;
- geodeziniai matavimai, reljefo matavimai.

Klaipėdos universiteto laivo „Mintis“ pagrindiniai techniniai duomenys pateikiami 2 lentelėje.

2. lentelė. Pagrindiniai laivo techniniai duomenys

Pavadinimas	Reikšmė
Laivo tipas	Katamaranas
Ledo klasė	ICE – 1C
Bendras laivo tonažas	499 GT
Laivo dedveitas	Apie 100 t
Visas laivo ilgis	38,70 m
Laivo ilgis tarp statmenų	35,25 m
Laivo plotis (ties mideliu)	12,00 m
Katamarano vieno korpuso plotis (ties mideliu)	3,97 m
Borto aukštis	4,50 m
Grimzlė (vasaros krovininės markės ribose)	2,80 m
Plaukiojimo autonomiškumas	21 diena
Plaukiojimo nuotolis	200 jūrmylės
Maksimalus laivo greitis	12,50 kts
Ekonominis laivo greitis	11,50 kts
Atstumas tarp vandens ir katamaranus jungiančios platformos	1,20 m
Bendra pagrindinių variklių galia	2000 kW
Įgulos skaičius laive	6 asmenys
Mokslinio personalo skaičius laive	Iki 12 asmenų

KU mokslinių tyrimų laivo privalumas yra plaukiojimo regionas. Dėl savo techninių parametrų – mažos grimzlės, manevringumo, ekonomiškumo, dydžio ir pan. šio laivo plaukiojimo regionas išsiplėčia iki didesnių upių žiočių – kas suteikia šiam laivui dar didesnių tyrimo galimybių.

Laivo plaukimo nuotolis yra apie 200 jūrmylių (370 km) nuo kranto, esant vėjo greičiui iki 20 metrų, o bangų aukščiui – 3,5 metro. Įgulą sudaro 6 žmonės, o bendrai gali keliauti iki 12 tyrėjų.

Pagrindinė šio laivo paskirtis yra plaukiojanti tyrimu bazė, tačiau ekonominiais sumetimais laivas naudojamas ir įvairesnio pobūdžio jūrinio sektoriaus veiklai vykdyti – jūrinės aplinkos monitoringas, taršos prevencijos funkcija ir pan.

4.1.3 KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ kilinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimai pagal linijinės laivo išilginio supimosi teorijos metodiką.

Katamarano vertikaliam ir kiliniam supimuisi apskaičiuoti naudojama Microsoft Office Excel programa su papildomais moduliais, kurią aptarėme 4.1.1 skyriuje.

Tiriamąjį objektą – Klaipėdos universiteto mokslinių tyrimų laivą „Mintis“. Laivas bei jo techniniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyriuje. Laivo teorinis brėžinys pateikiamas 1 priede.

Norint atlikti skaičiavimus reikia sudaryti skaičiavimo užduotį:

- Nustatyti laivo tipą (vienkorpūsis arba katamaranas) ir stabilizatorius;
- Parinkti jūrines sąlygas;
- Surašyti visus katamarano techninius parametrus, reikalingus skaičiavimams;
- Aprašyti stabilizatorius (išdėstymo schemą, matmenis ir pan.). Priartėjimo būdu parinksime katamarano stabilizatorių dydį ir išdėstymą, kad gautume geriausią efektą – slopinimą bangavimo metu.

Skaičiavimo užduotis formuojama pagal bandymus ir skaičiavimus kuriuos atliko Lubys D. savo baigiamajame darbe, kad duomenys galėtų būti lyginami analogiškai. Užduoties sąlygos – bangos ilgis – 12 m. Bangos su laivo korpusu susiduria 180° kampu, o laivo greitis 8 mazgai. Papildomai apskaičiuota ir 40 m. ilgio banga su povandeniniu sparnu ir be sparno, nes numatoma, kad plaukiant tokiomis jūrinėmis savybėmis, korpusas patiria didžiausias apkrovas, inercines jėgas – išilginį supimą.

Skaičiavimo užduotis formuojama šviesiai žalios spalvos langeliuose, (žr. 3 lentelę.) ir reikšmių aprašymas (žr. 4 lentelę)

3. lentelė. Laivo ir supimosi slopintuvų parametrų nustatymas

Konstantos	
g, m/s^2	9.81
r, t/m^3	1.025
g, kN/m^3	10.05525
Laivo požymiai	
Korpusas	2
Supimosi slopintuvai - sparnai	1
Laivapriekis - Laivagalis	1
Sparnų valdymas	
Laivapriekis	0
Laivagalis	0

4. lentelė. Laivo ir supimosi slopintuvų parametrų reikšmių aprašymas

Reikšmė	Aprašymas
Korpusas	1 – vienkorpasis laivas 2 – katamarano tipo laivas
Supimosi slopintuvai – sparnai	0 – nėra 1 – yra
Laivagalis – Laivapriekis	1 – laivapriekinis sparnas 2 – laivagalinis sparnas 3 – laivapriekinis ir laivagalinis sparnai.
Laivapriekis	0 – nevaldomas sparnas 1 – valdomas sparnas
Laivagalis	0 – nevaldomas sparnas 1 – valdomas sparnas

Tiriant laivo judėjimo sąlygas, esant laivo supimuisi bangose, yra būtina nustatyti bangos parametrus – bangos ilgį bei bangos sklidimo kampą (žr. 5 lentelę.).

5. Lentelė. Bangos parametrai

Bangos parametrai	
λ , m	12
ε , laipsn.	180
r_0 , m	0.550
τ , 1/s	3

Toliau įvedamos skaičiuojamojo laivo pagrindinės charakteristikos (žr. 6 lentelę). Duomenys, rašomi į šviesiai žalios spalvos langelius. Reikšmės, esančias baltos spalvos langeliuose, programa paskaičiuoja automatiškai.

6. Lentelė. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos

Laivo charakteristikos		Laivo charakteristikos	
L, m	38,64	a	0,5431
B, m	3,975	δ	0,4565
d, m	3	S_o, m^2	125,64
V, m^3	633,62	i_y, m^4	13014,00
D, κH	3185,60	I_y, m^2	29239,50
M, τ	324,73	v_s, y^3	8
Zg, m	5	v, m.c	4,12
Xg, m	-0,09	Fr	0,212
Zc, m	1,634	dL, m	3,864
Xc, m	-0,349	L/B	9,72
Xi, m	1,314	R, m	22,97
		C, m	4,05
		c = C/2B	0,51

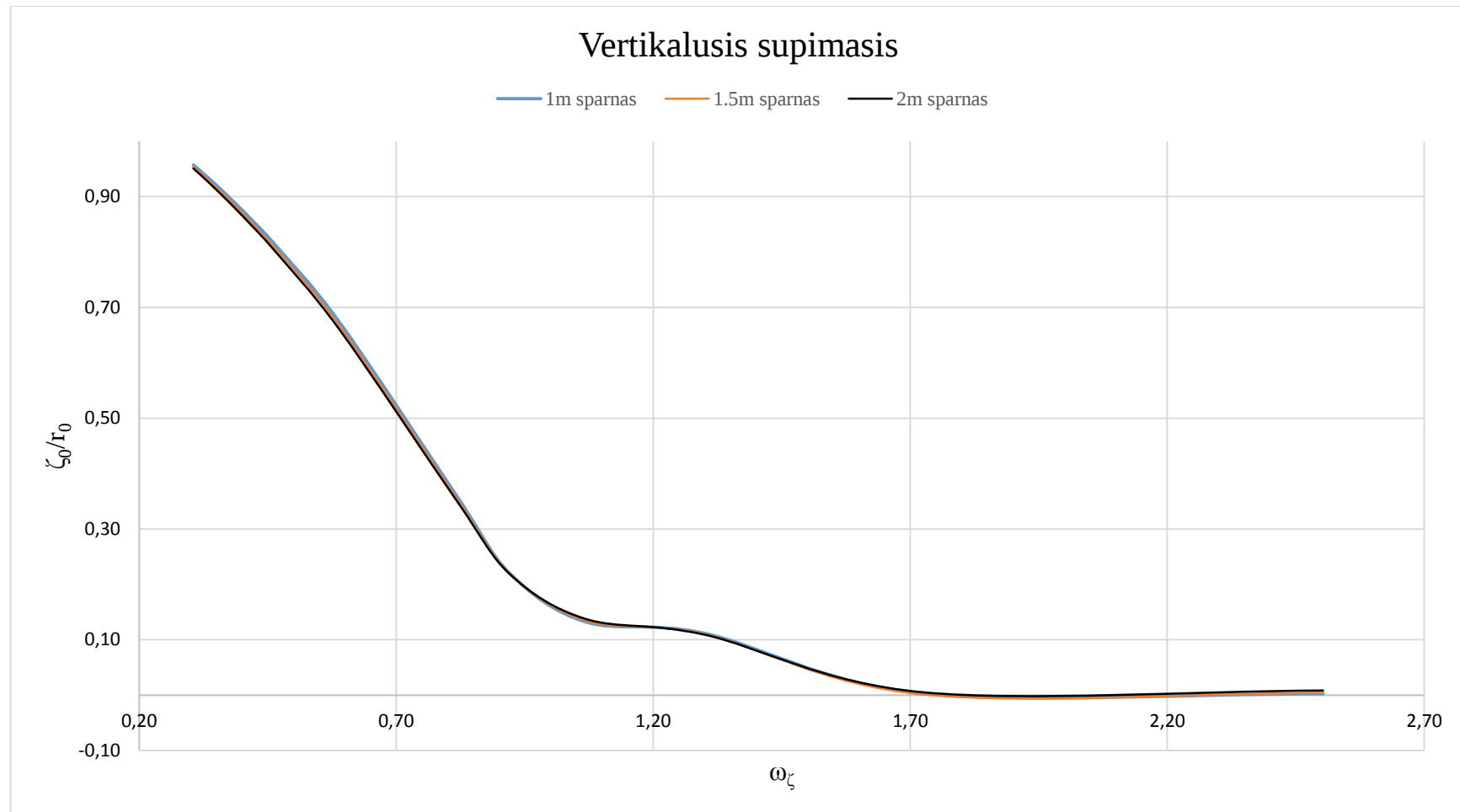
Skaičiuojant laivo hidrodinaminių jėgų dedamąsias įvedame papildomus laivo duomenis: španhautų skerspjuvių plotus, pločius ir grimzlę (atstumą nuo vaterlinijos iki kilio linijos) ir pan. Visi parametrai surašyti Lubys D. baigiamajame darbe, todėl jie nekartojami.

Sekantis žingsnis - povandenio sparno parinkimas. Sparno charakteristikos nustatomos priartėjimo būdu, kai keičiami sparno parametrai – plotas $b=1; 1,5; 2m$. programoje ir analizuojant, kuris variantas bus efektyviausias. Rezultatai surašyti 7 lentelėje.

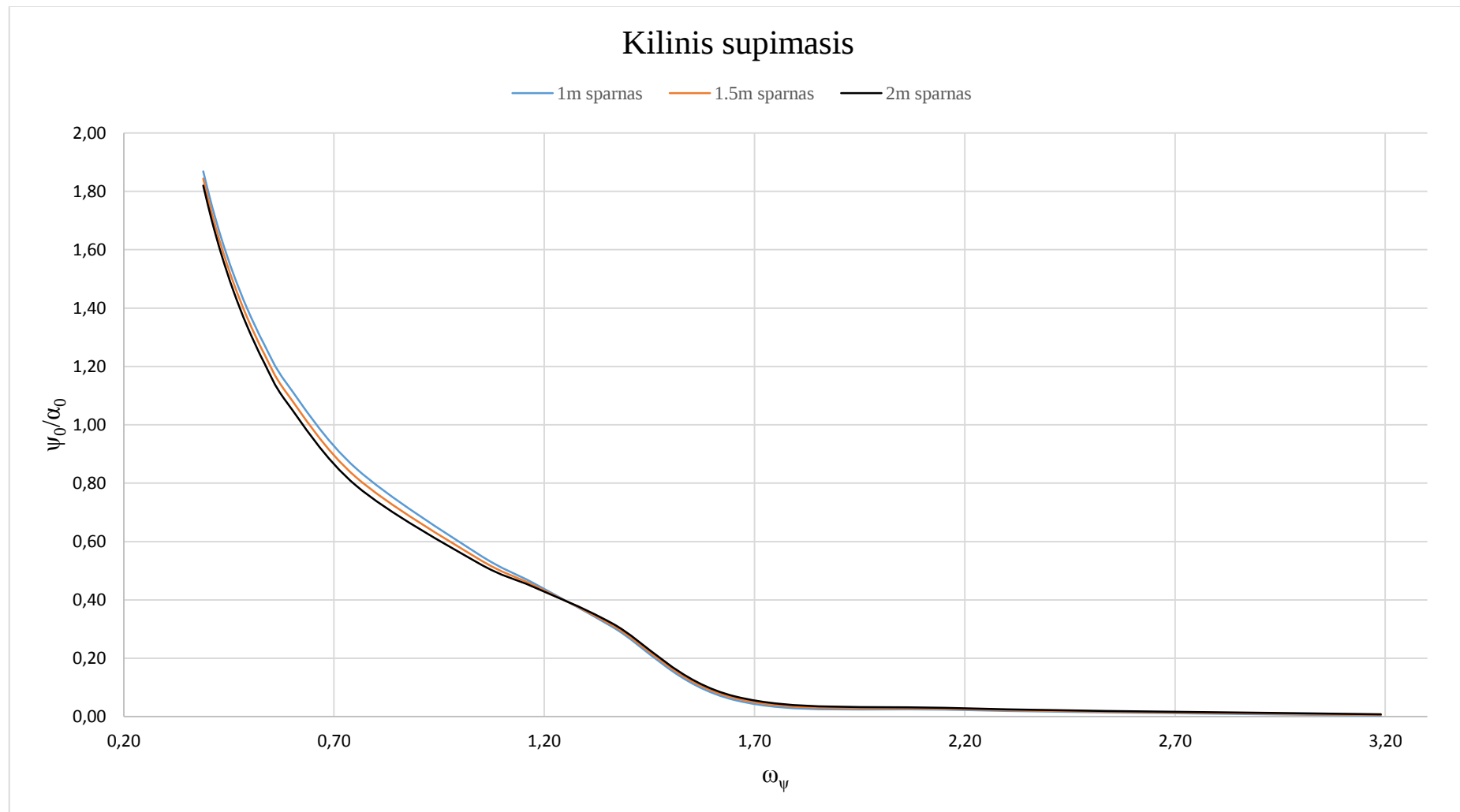
Iš gautų rezultatų sudaromi grafikai vertikalų (žr. 15 pav.) ir kilinių (žr. 16 pav.) supimosi priklausomybių nuo supimosi dažnių charakteristikos. Rezultatai ir kreivės lyginamos, norint sužinoti, kuris iš 1m, 1.5m ar 2m pločio sparnų bus efektyviausias slopinant vertikalų ir kilinį supimasį.

7. Lentelė. 1m, 1.5m ir 2m pločio sparnų vertikalios ir kilinio supimosi rezultatai

Sparno plotis	Parametras	Bangos ilgis													
1m	l, m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	30	20	12
	ω_{ζ}	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,46	0,59	0,82	0,92	1,07	1,30	1,73	2,50
	ζ_0/r_0	0,96	0,94	0,93	0,91	0,89	0,86	0,82	0,67	0,36	0,22	0,13	0,11	0,00	0,00
	ω_{ψ}	0,39	0,41	0,43	0,46	0,49	0,53	0,59	0,75	1,04	1,17	1,36	1,66	2,20	3,19
	ψ_0/α_0	1,87	1,75	1,64	1,52	1,40	1,27	1,14	0,85	0,56	0,46	0,31	0,06	0,02	0,00
1.5m	l, m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	30	20	12
	ω_{ζ}	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,46	0,59	0,82	0,92	1,07	1,30	1,73	2,50
	ζ_0/r_0	0,95	0,94	0,93	0,91	0,88	0,85	0,81	0,67	0,36	0,22	0,13	0,11	0,00	0,00
	ω_{ψ}	0,39	0,41	0,43	0,46	0,49	0,53	0,59	0,75	1,04	1,17	1,36	1,66	2,20	3,19
	ψ_0/α_0	1,84	1,73	1,61	1,49	1,37	1,24	1,11	0,82	0,54	0,45	0,31	0,06	0,03	0,01
2m	l, m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	30	20	12
	ω_{ζ}	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,46	0,59	0,82	0,92	1,07	1,30	1,73	2,50
	ζ_0/r_0	0,95	0,94	0,92	0,90	0,88	0,85	0,81	0,66	0,35	0,22	0,14	0,11	0,01	0,01
	ω_{ψ}	0,39	0,41	0,43	0,46	0,49	0,53	0,59	0,75	1,04	1,17	1,36	1,66	2,20	3,19
	ψ_0/α_0	1,82	1,70	1,58	1,46	1,34	1,21	1,08	0,79	0,53	0,44	0,32	0,07	0,03	0,01



15. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su 1m, 1.5m ir 2m pločio pasyviu laivapriekiniu sparnu vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.



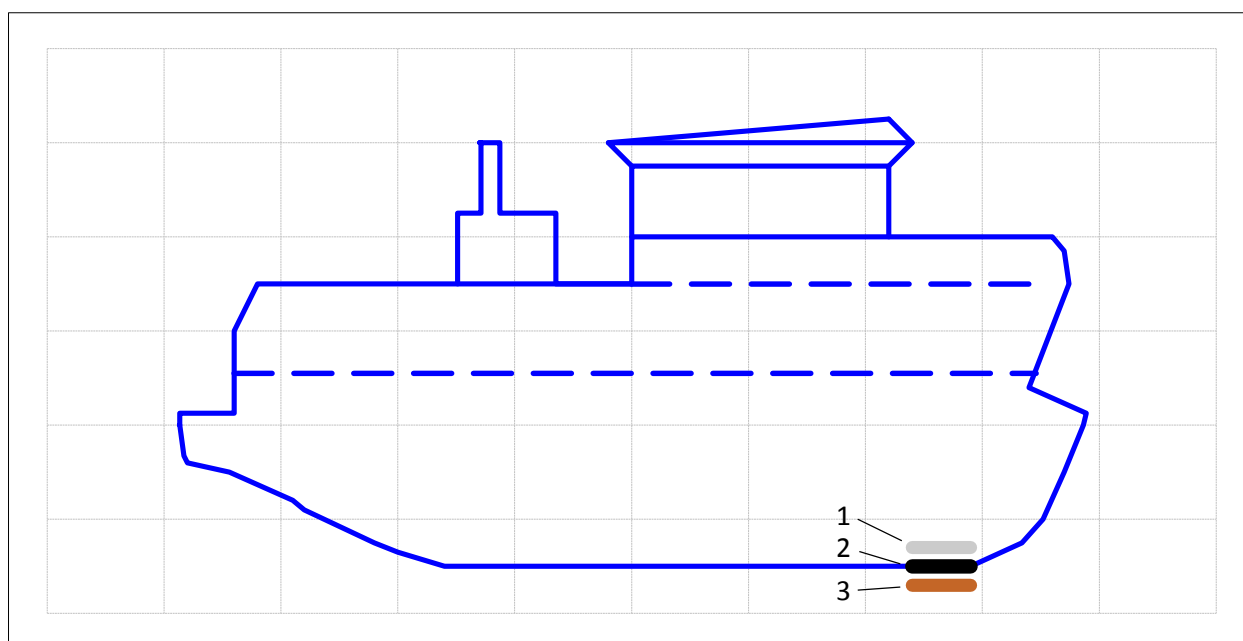
16. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su 1m, 1.5m ir 2m pločio pasyviu laivapriekiniu sparnu kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.

Rezultatai diagramose skiriasi, tačiau kai kuriose vietose labai nežymiai. Ypač tai matoma vertikalaus supimosi grafike (15 pav.), kur kreivės praktiškai užstoja viena kitą. Todėl skaitinės reikšmės identifikuoja, kokio ploto povandeninis sparnas darys didžiausią slopinimo efektą.

Iš rezultatų 7 lentelėje matyti, kad didžiausią supimosi slopinimo efektą darys 2m. pločio sparnas (nors ir prie didesnio kilinio supimosi dažnio ($\omega_\psi > 1$) kreivės susikerta ir susikeičia pozicijomis, tačiau labai nežymiai), todėl tokį sparną naudosime skaičiavimuose.

Kai nustatomas povandeninio sparno plotas, toliau reikia parinkti povandeninio sparno montavimo padėtį:

Povandeninį sparną KU mokslinių tyrimų laivui galima įrengti keliose padėtyse (17 pav.), todėl reikia nustatyti, kuri padėtis geriausiai slopinis vertikalią ir kilinį supimasį. Tarpas tarp 1 ir 2 - 2 ir 3 padėčių lygus 0,4 metro, o montavimo atskaitos tašku laikoma kilio linija.



17. pav. Povandeninio sparno galimų įrengimo vietų variacijų schemas (1 – Virš kilio linijos, 2 – Sparno apatinė plokštuma lygi kilio linijai, 3 – Po kilio linija)

Sparno storis numatomas 0,2m, o povandeninio sparno padėtis skaičiuojama nuo sparno centro, todėl kad sparno ir kilio linija sutaptų – rezultatas lentelėje yra 0,1m, o kitos padėties numatytos analogiškai: –0,3m. ir 0,5m.

Su kiekviena povandeninio sparno padėties variacija (žr. 17 pav.) MS Excel sudaryta programa apskaičiuoja vertikalaus ir kilinio supimosi dažnines charakteristikas, su įvairiais bangos ilgiais. Vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatai su skirtingomis povandeninio sparno variacijomis pateikti 8 lentelėje.

8. Lentelė. KU mokslinių tyrimų laivo povandeninio sparno tvirtinimo padėčių supimosi efektyvumo rezultatai.

Bangos ilgis Parametras	200	150	100	60	50	40	30	20	12
Kai sparno pozicija: 0,5m virš kilio linijos (0,5m)									
ζ_0 , m	3,97	2,94	1,77	0,64	0,35	0,19	0,12	0,00	0,00
ζ_0 / l_r	0,88	0,81	0,66	0,35	0,22	0,14	0,11	0,01	0,01
ψ_0 , laipsn.	10,89	9,44	7,66	5,80	5,12	3,89	0,90	0,41	0,13
ψ_0 / α_0	1,34	1,08	0,79	0,53	0,44	0,32	0,07	0,03	0,01
Kai sparno pozicija: ties kilio linija (0,1m)									
ζ_0 , m	3,97	2,94	1,77	0,64	0,35	0,19	0,12	0,00	0,00
ζ_0 / l_r	0,88	0,81	0,66	0,35	0,22	0,14	0,11	0,01	0,01
ψ_0 , laipsn.	10,89	9,44	7,66	5,80	5,12	3,89	0,90	0,41	0,13
ψ_0 / α_0	1,34	1,08	0,79	0,53	0,44	0,32	0,07	0,03	0,01
Kai sparno pozicija: 0,3m. po kilio linija (-0,3m)									
ζ_0 , m	3,97	2,94	1,77	0,64	0,35	0,19	0,12	0,00	0,00
ζ_0 / l_r	0,88	0,81	0,66	0,35	0,22	0,14	0,11	0,01	0,01
ψ_0 , laipsn.	10,89	9,44	7,66	5,80	5,12	3,89	0,90	0,41	0,13
ψ_0 / α_0	1,34	1,08	0,79	0,53	0,44	0,32	0,07	0,03	0,01

Vetikalaus ir kilinio supimosi rezultatai lentelėje yra identiški, atsižvelgiant į tai, kad sparno padėtys yra skirtingos. O tai reiškia, kad sparno padėtis šiuo atveju nedaro arba daro tokią nedidelę reikšmę, kad vertinti tai būtų nereikšminga. Todėl parenkama, kad povandeninis sparnas bus pritvirtintas tarp korpusų 0,1m. aukščiau nuo kilio linijos, taip supaprastinant konstrukciją ir dėl patogumo – nes išsikišusių dalių nėra, o tai reiškia kad vertikalus klirensas lieka toks pats.

Suvedame visus nustatytus parametrus kaip pavaizduota 9 lentelėje.

9. Lentelė. Povandeninio sparno parametrai

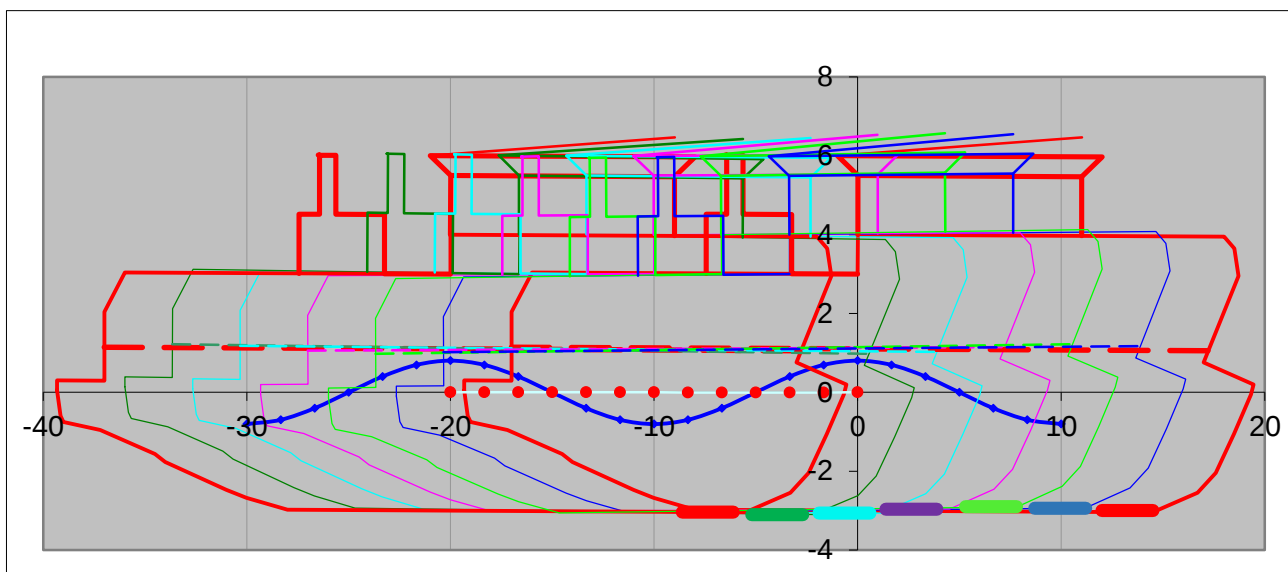
Sparno koeficientai			Sparno koeficientai		
Priekinis sparnas			Priekinis sparnas		
K_1^{kn} 1	K_2^{kn} 2	K_3^{kn} 3	K_1^{kn} 1	K_2^{kn} 2	K_3^{kn} 3
0	0	0	0	0	0
	α^{kn_0} , laipsn.	0		x^{kn} , m	18
	$dC_y/d\alpha^{kn}$	4.570		l^{kn} , m	18.09
	a^{kn} , m	3		p^{kn}	1
	b^{kn} , m	2		h^{kn} , m	2.6
	λ^{kn}	1.5		x	z
	z^{kn} , m	0.1		0	0
	S^{kn} , m ²	3		0	0

Ištačius visus reikalingus parametrus programa atlieka skaičiavimus ir nubrėžia vertikalios ir kilinio supimosi grafikus. Skaitinės reikšmės pateiktos 2 priede.

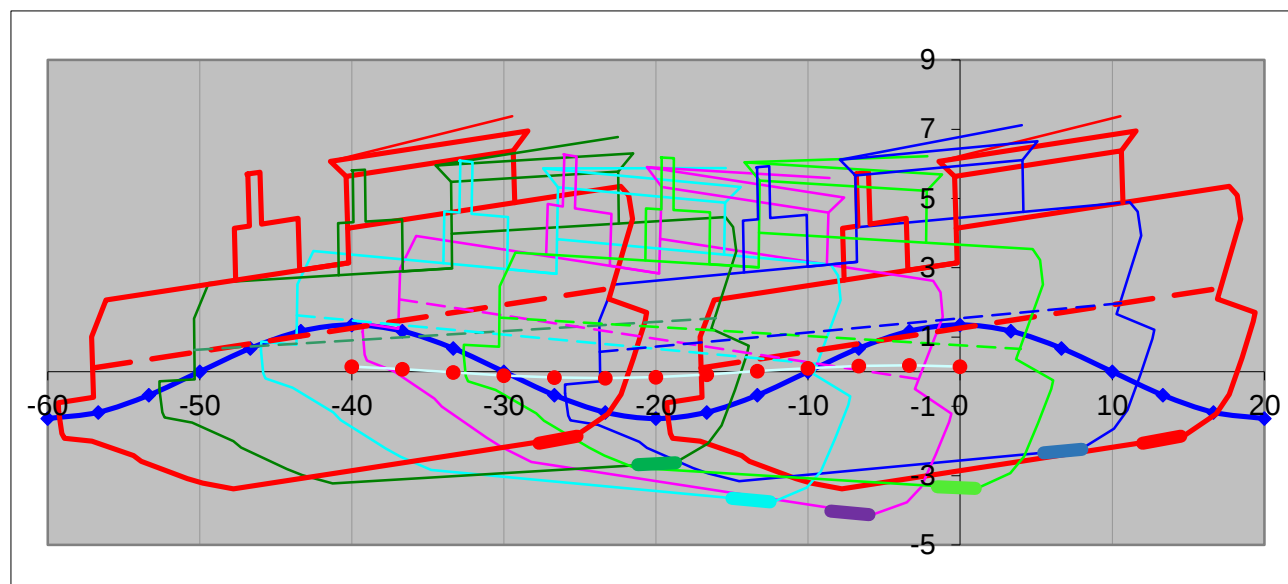
Grafikuose pateikta:

- Laivo supimosi fazės ant bangos įvairiais laiko momentais (žr. 18 ir 19 pav.),
- Laivo denio užliejimo grafikas (žr. 20 ir 21 pav.).
- Sudaromi KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivaprieikiniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos (žr. 22 ir 23 pav.).

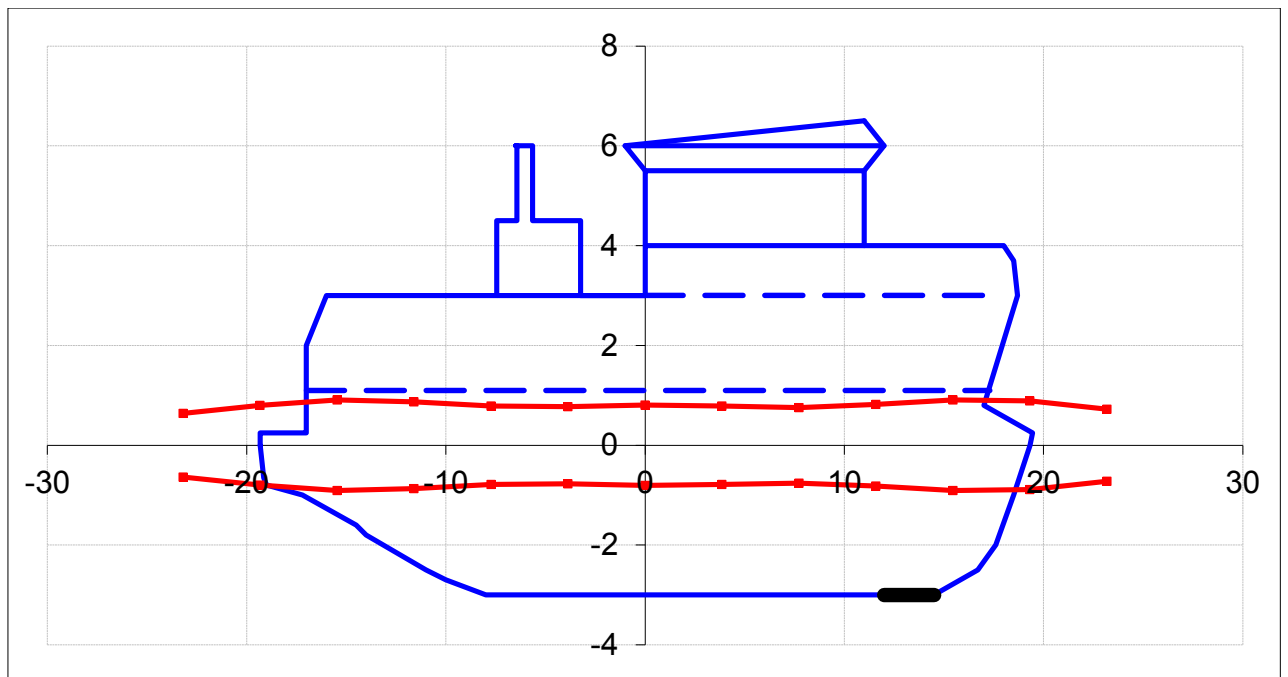
18. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu supimosi pobūdis įvairiais laiko



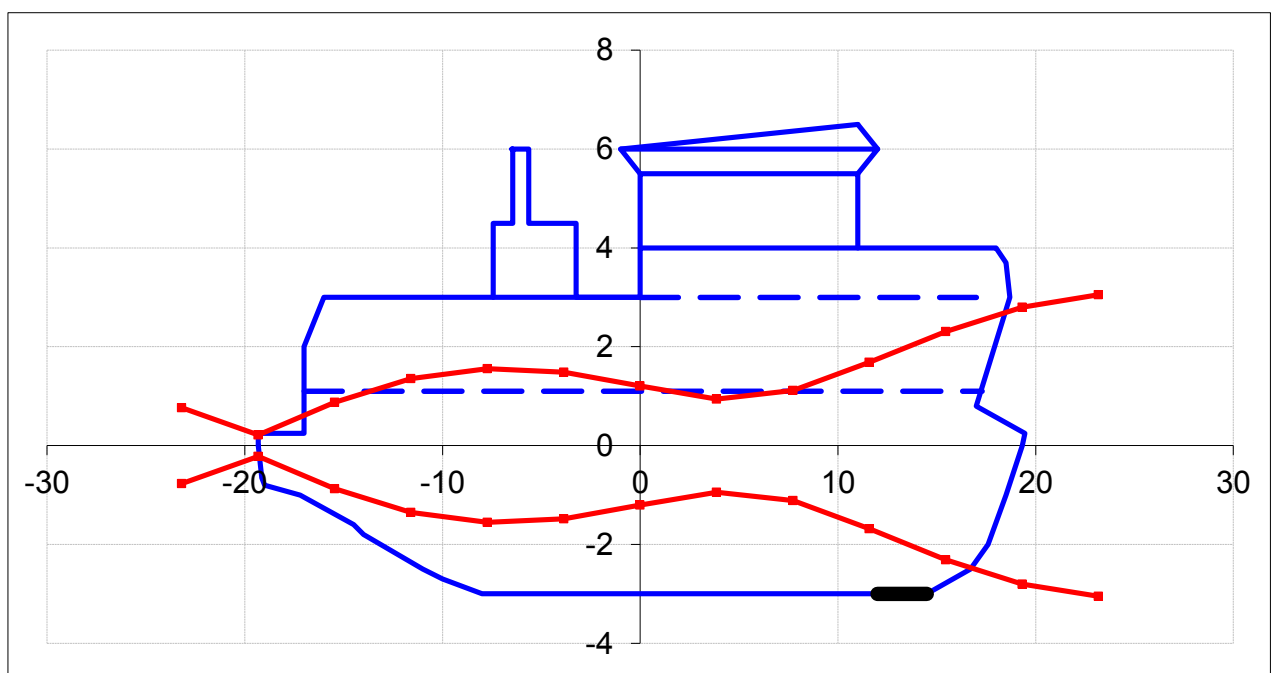
momentais. Laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 12 metrų.



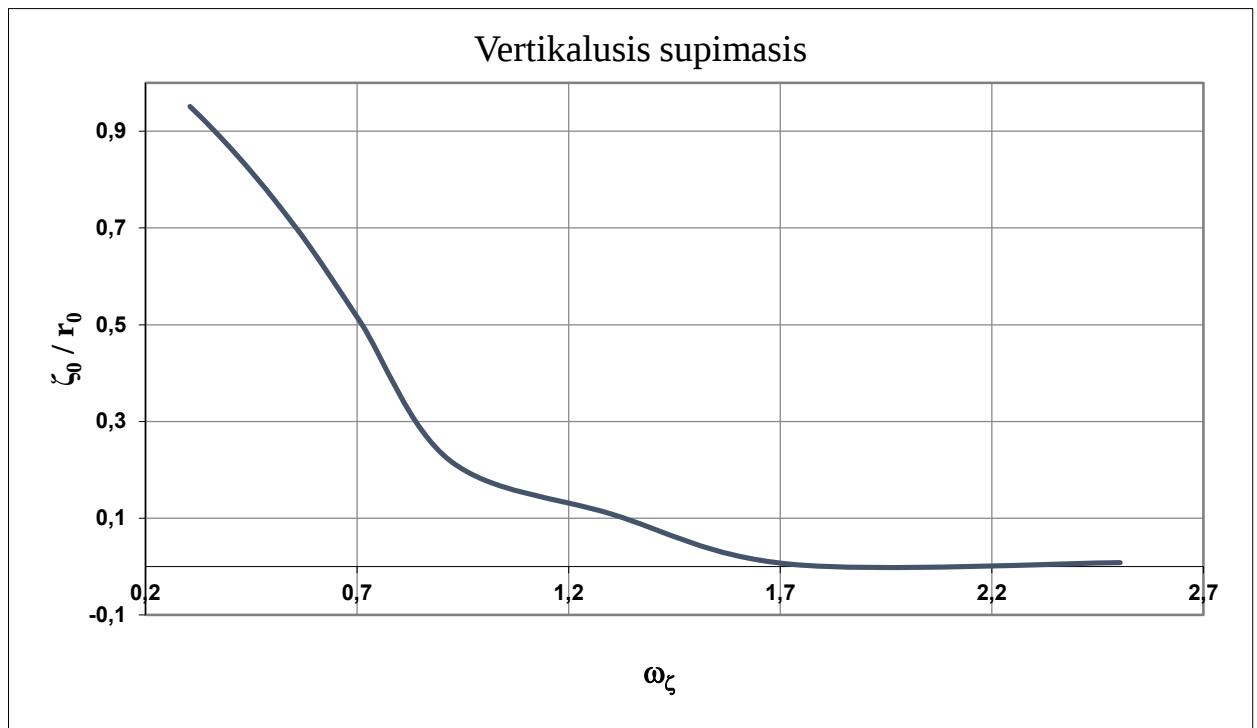
19. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu supimosi pobūdis įvairiais laiko momentais. Laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 40 metrų.



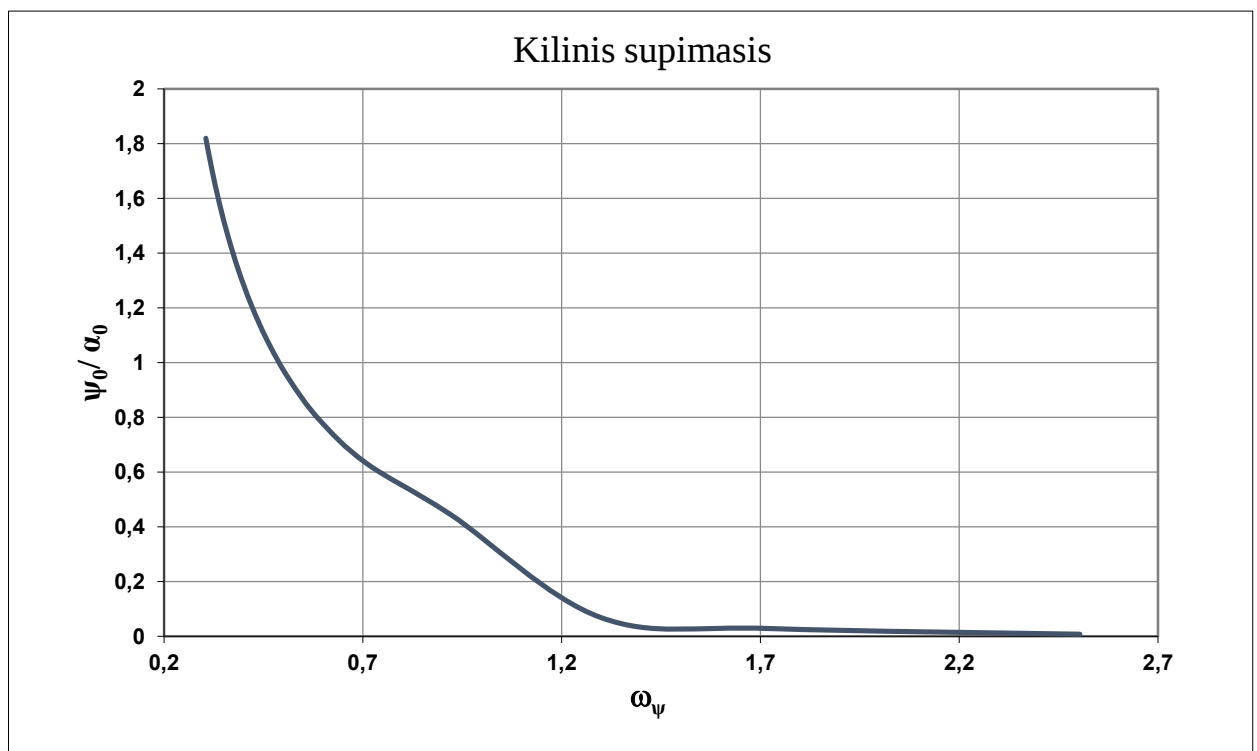
20. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 12 metrų



21. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 40 metrų



22. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivaprieikiniu sparnu vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.



23. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivaprieikiniu sparnu kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.

4.2 KU Mokslinių tyrimų laivo supimosi skaičiavimai naudojant CFD programinę įrangą

Antrajai tyrimų daliai naudosime programą pavadinimu „FLOW 3D“. Ši programa naudoja RANS (angl. Reynolds avaraged Navier – Stokes simulation) skaičiavimų algoritmą, kurio paskirtis yra skaičiuoti programoje sudarytą skysčio srautą aptekantį sumodeliuotą kūną. Dar kitaip šios programos skaičiavimo metodika vadinama CFD (angl. Computational Fluid Dynamics), išvertus – skaičiuojama skysčių dinamika.

Tęstinumo lygtis teigia, kad masės kitimo intensyvumas begalo mažame kontroliuojamame sraute yra lygus masės intensyvumo tekėjimui per jį ribojantį paviršių (4.2.1 formulė):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \quad (4.2.1)$$

Tada momentų lygtims taikoma ta pati taisyklė, tik papildoma jėgų suma, kurios veikia tame sraute (4.2.1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + pf_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v V) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + pf_y \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \omega V) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + pf_z \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

čia, $V = (u, v, \omega)$

Šioje programoje sudaromas skysčio srautas pagal masės, momentų ir energijos dėsnius, kurie ir sudaryti pagal Navier – Stokes formules. Kitaip nei kitose programose (Autoship, Solidworks) ši programa analizuoja ne patį kūną veikiančias jėgas, bet srautą veikiančias jėgas, kai šis susiduria – apteka kūną. „FLOW 3D“ simuliacijoje modeliuojamas tyrimas gali būti sudarytas ir su skysčiu ir su dujomis nurodytose zonose – taip imituojant maksimaliai realų tyrimą.

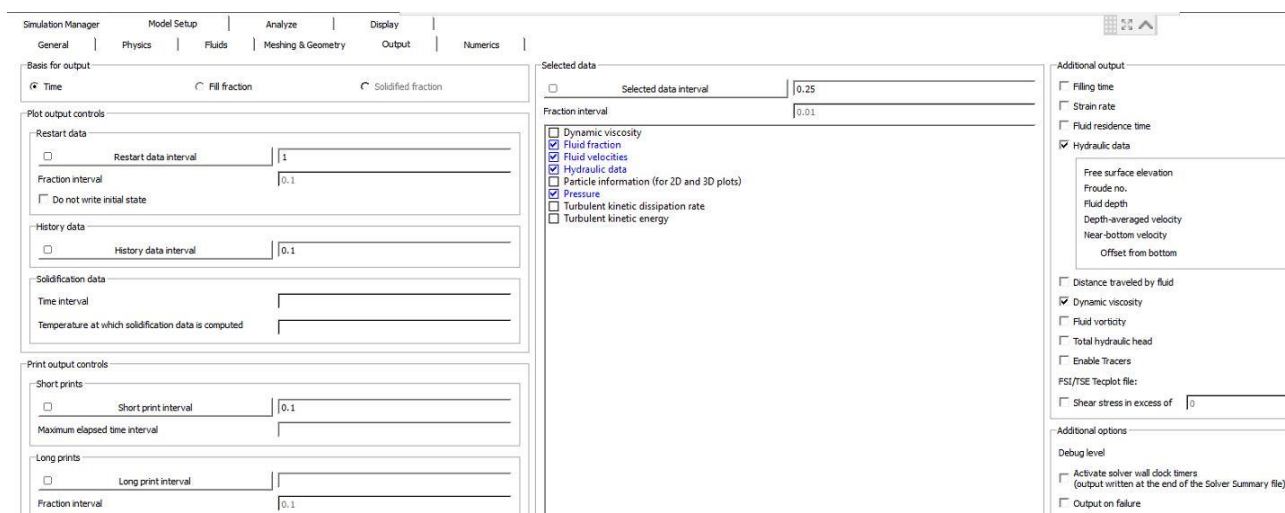
Tačiau ši skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa turi ir trūkumų, kai reikalaujami dinamiškesni srauto režimai, kai laivo korpuso kampas su vandens paviršiumi (krenas, diferentas) ir grimzlė tampa labai dideli ($F_n > 0,15$).

Ši programa ypatingai naudinga taupant resursus – nereikia natūrinio eksperimento, baseino eksperimento ir pan., o tai sutaupo žmonių laiką, kurą ir kitus resursus.

Prieš pradėdant skaičiuoti „FLOW 3D“ programa reikia turėti laivo modelį, kuris bus įkeltas į programą skaičiavimams. Naudojamas tas pats modelis, kurį naudojo Lubys D. savo baigiamajame darbe ir papildomas povandeniniu sparnu, kurio matmenis ir poziciją apskaičiavome 4.1.3 skyriuje. Laivo teorinis brėžinys pridėtas 1 priede.

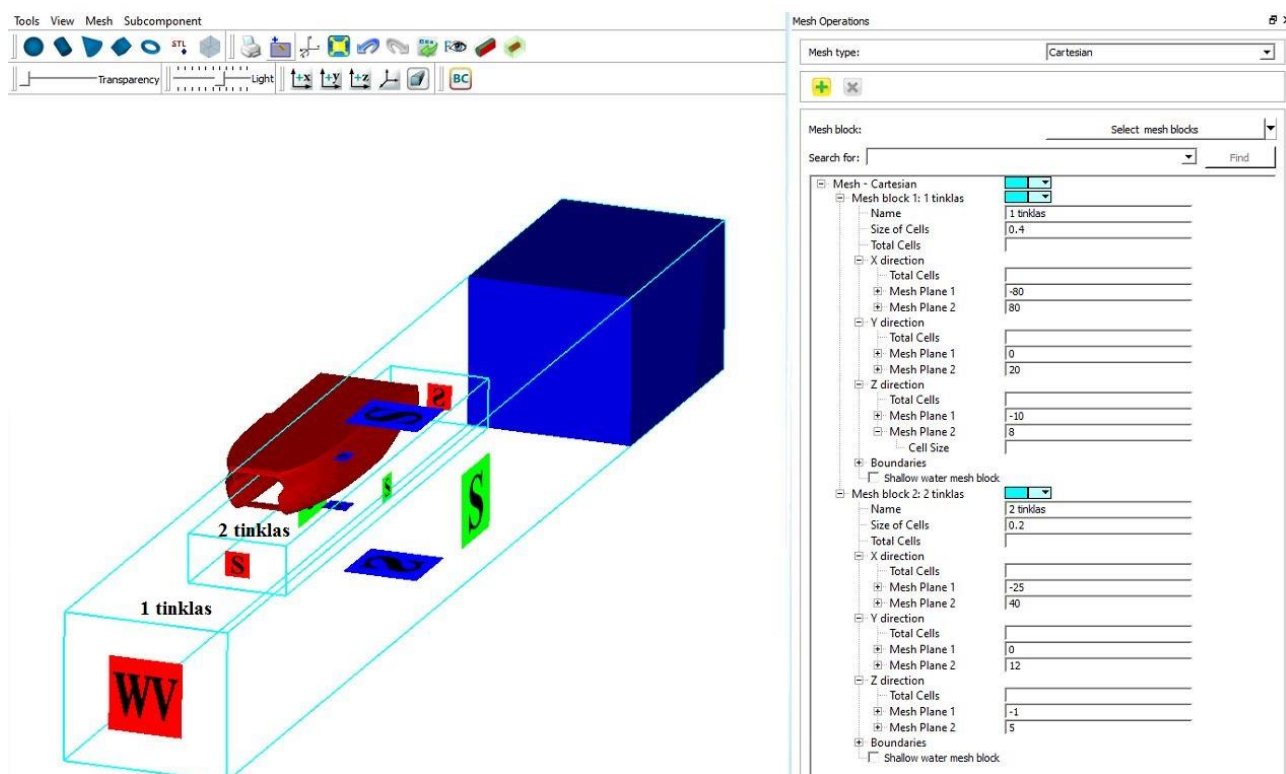
Kilinio ir vertikalaus supimosi skaičiavimo „FLOW 3D“ 10.1.1 versija metodika:

- (1) Naujos direktorijos sukūrimas skaičiavimo duomenims saugoti (Add new simulation);
- (2) Fizikinių dėsnių – reiškinų nustatymas:
 - a. Gravitacinių parametrų įvedimas (Model setup / Physics / Gravity and non-inertial reference frame). Nustatomas laisvojo kritimo pagreitis ($9,81 \text{ m/s}^2$) Z ašyje.
 - b. Aktyvuojame judančio kūno modelį (GMO) uždedami varnelę (Model setup / Physics / Moving and simple deforming object). Judantis objektas/ vandens srauto judėjimas – Implicit).
 - c. Nurodomi srauto parametrai – uždedama varnelė ant langelio „Viscous flow“ (Model setup / Physics / Viscosity and turbulence);
- (3) Įvedami srauto parametrai: vandens tankis $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ skirtuke (Model setup / Fluids).
- (4) Nustatome išėigos dydžius kuriuos generuos programa, kilinis ir vertikalusis supimasis, (Model setup / Output), kaip parodyta 24 paveiksle.



24. pav. Išėigos rezultatų parametrai

- (5) Nustatome laiko intervalą, po kurio programa užbaigs skaičiavimus. Įvedamas (finish time) 120 sekundžių skirtuke (Model setup / General), Toks laiko intervalas yra pakankamas norint gauti tikslius rezultatus, nes laivo korpuso supimais po pirmojo vandens srauto antplūdžio nusistovi banguojant ir tampa cikliškas. Tada galima rezultatus vertinti objektyviai. Taip pat nustatomas laiko žingsnis – 0,05 skirtuke (Model setup / Numerics). Minimalus laiko žingsnis antrame langelyje paliekamas 0.
- (6) Įkeliamas nubraižyto laivo geometrijos failas (Model setup / Meshing & Geometry) užduočių juostoje paspaudus Import geometry mygtuką .
- (7) Įkeliami 2 skaičiavimo tinkleliai (Model setup / Meshing & Geometry) dešinėje pusėje parinkdami tinklelio tipą (Mesh type: Certesian) ir paspaudus mygtuką pridėti . Šie tinkleliai turi savo dydžius, kurie pateikti 25 paveiksle.

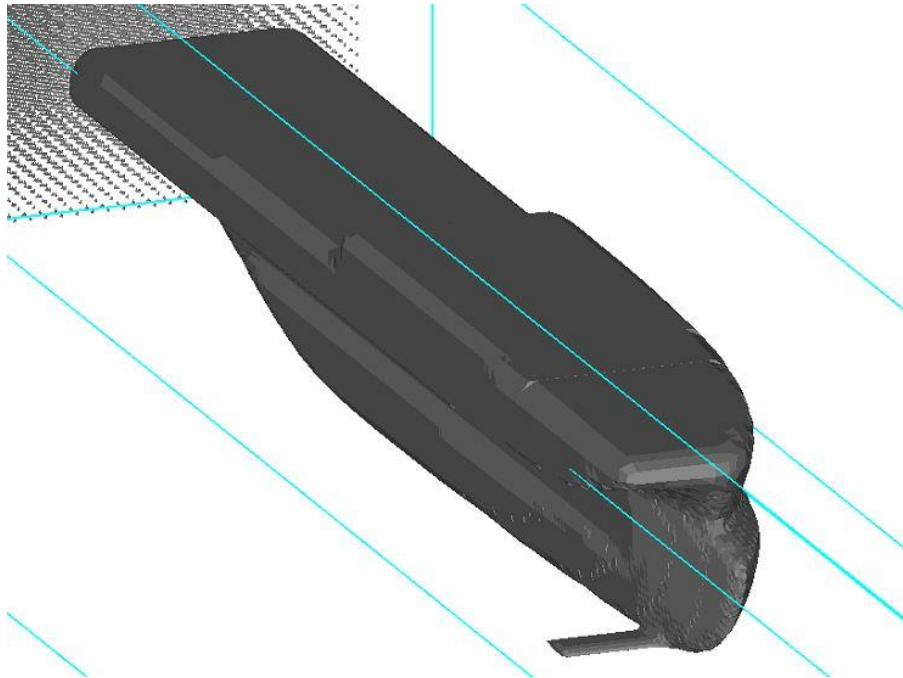


25. pav. Skaičiavimo tinklelių nustatymai

Korpuso viena pusė turi būti tinklelių ribose, o kita pusė už jos ribų, kadangi bus tiriama tik viena katamarano pusė. Kita pusė analogiškai judės lygiai taip pat. Taip daroma norint sumažinti skaičiavimo laiką.

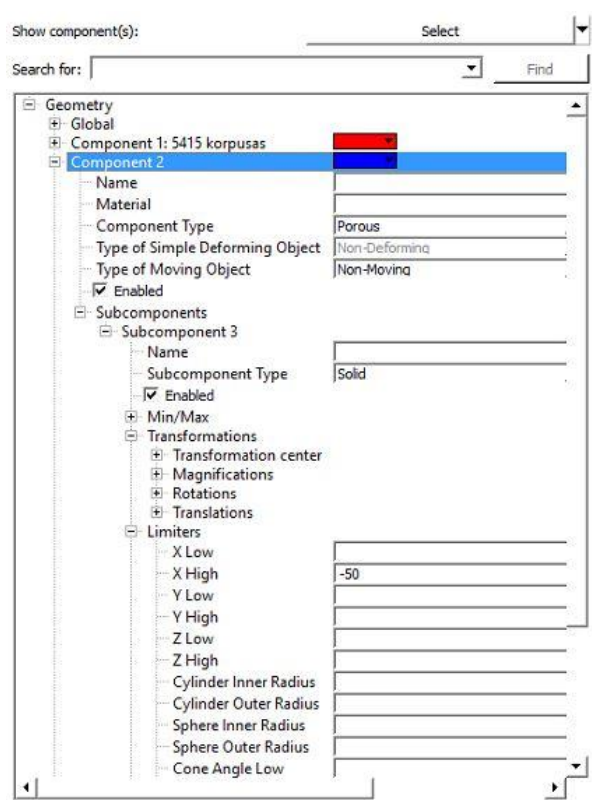
1 tinklelis – tai bendra eksperimento zona, kurioje vyks skysčio ir laivo korpuso judėjimas. Šis tinklelis bus retesnis, kadangi rezultatai šioje zonoje mūsų nedomina.

2 tinklelis – tai korpuso tinklelis – jo tankumas parenkamas toks kad aproksimavus korpusą šis nesigautų kampų. Korpuso forma turi būti pakankamai tiksli, jei norima gauti tikslius ir teisingus rezultatus. 26 paveiksle pavaizduota eksperimento aproksimuota korpuso forma (tęsinys kitame puslapyje).



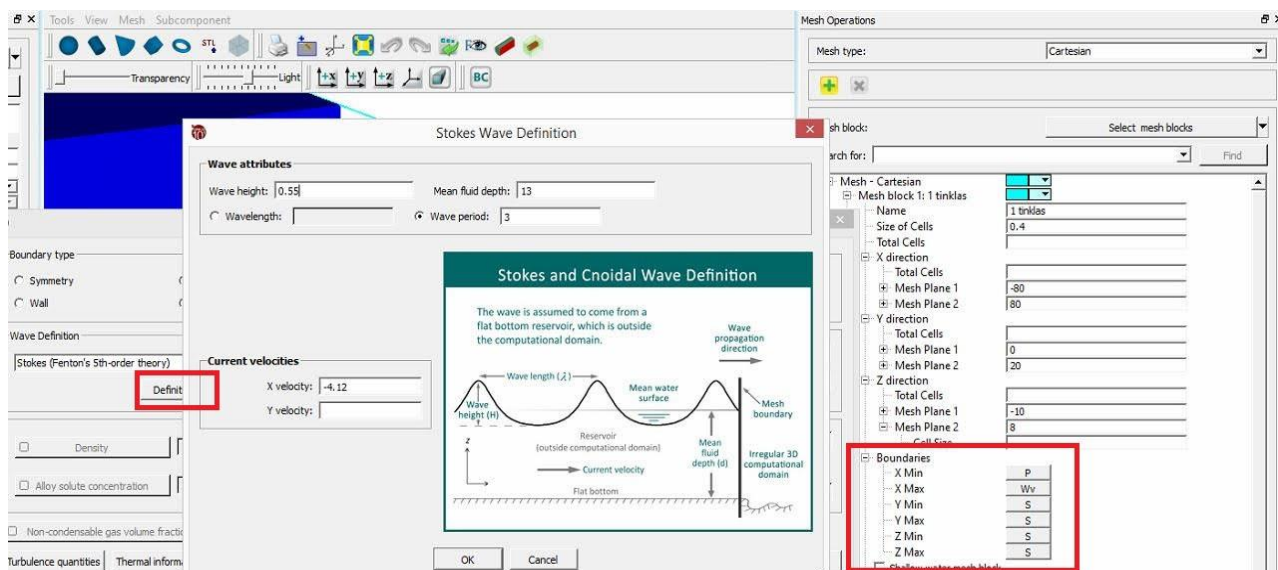
26. pav. Aproximuota korpuso forma

(8) Į skaičiavimo tinklelio pabaigą įtraukiame bangas absorbuojančią zoną. Ši zona sukurama kaip kvadrato forma iš užduočių juostos. Jos nustatymai pavaizduoti 27 paveiksle.



27. pav. Bangas absorbuojančios zonos nustatymai

(9) Nustatomos pagrindinio tinklelio sienelių sąlygos – apribojimai – funkcijos. Tai padarome išskleidus Boundaries skirtuką 1 tinklelio medyje, kaip pavaizduota 28 paveiksle.

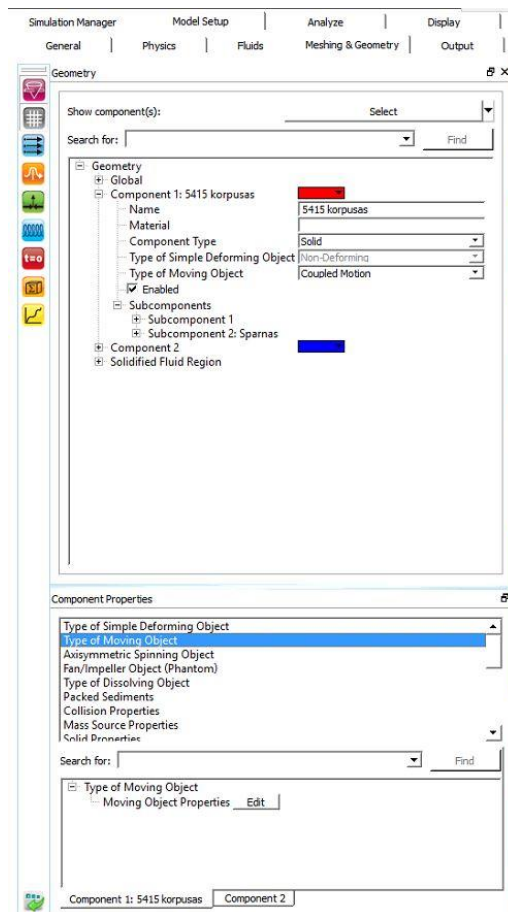


28. pav. 1-ojo Tinklelio sienelių nustatymai

- Įvedami parametrai $X_{\max}$ grafoje:
 - Bangos aukštis (0,55m)
 - Periodas (3 sekundės)
 - Vandens srauto greitį (4,12 m/s)
 - Vandens gylį (13 m).
- $X_{\min}$ – grafoje nustatome slėgį, tai reiškiasi, jog vandens lygis yra = const.
- Visose kitose grafose: $Y_{\min}$, $Y_{\max}$, $Z_{\min}$, $Z_{\max}$, nustatomi simetrijos nustatymai (angl. Symmetry), tai reiškia, jog simetrijos ribose nėra skaičiuojami šlyties momentai, vandens srauto greitis, ar veikiančios jėgos.

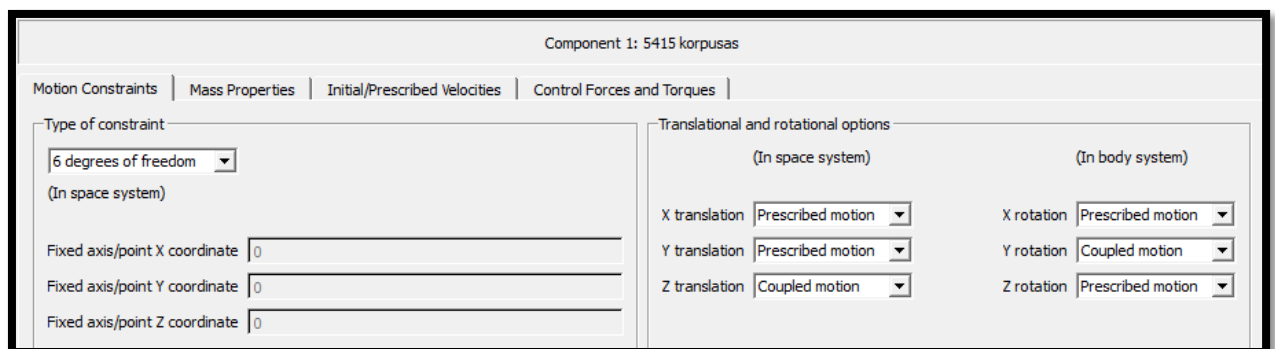
Korpusas eksperimento metu stovės vietoje, o vandens srautas aptekantis korpusą, jį judins aukštyn – žemyn ir sukios aplink Y ašį dėl susidariusio slėgio apink jį. Vandens tėkmės greitis įvedamas 4,12m/s, kurį padauginus iš periodo gausime 12,36 metrų ilgio bangą. Eksperimentas atliekamas ir su 40 m. ilgio banga.

(10) Parenkami paties korpuso judėjimo nustatymai. Šie nustatymai randami kairiajame nustatymų medyje paspaudus ant *Component 1:5415 korpusas* apačioje atsiranda nustatymų skiltis, kurioje paspaudus ant *Type Of Moving Object* atsiranda apačioje mygtukas *EDIT*, kaip parodyta 29 paveiksle.



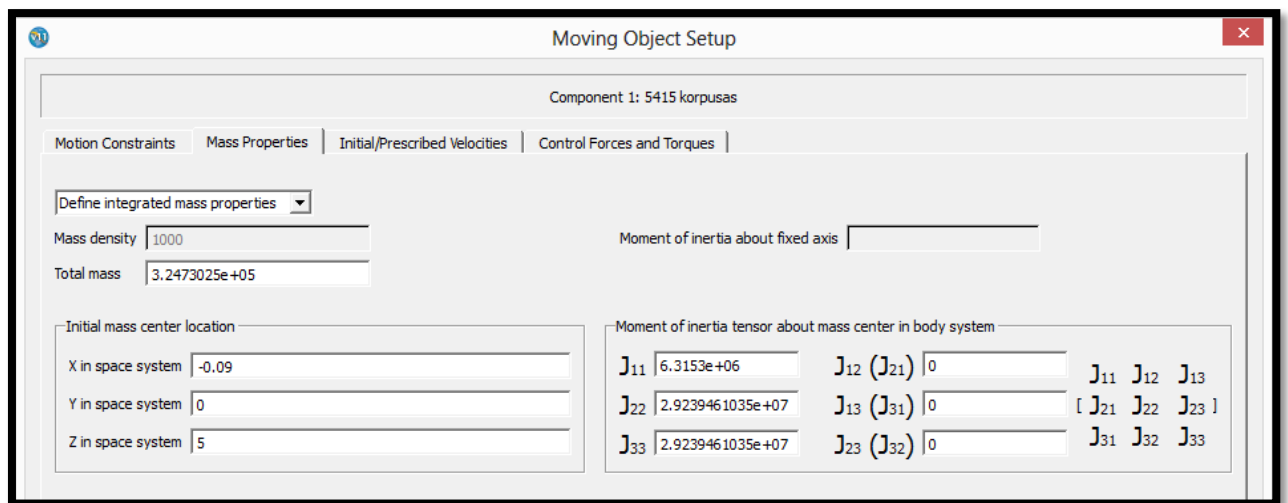
29. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (1)

Parenkame kūno laisvės laipsnių skaičių - 6, bet suvaržant judėjimą, kuris nereikalingas atliekant eksperimentą. Šiuo atveju nustatome, kad laivas galėtų judėti Z ašimi vertikaliai ir sukstis Y ašimi). Jei objektui leidžiama judėti ašimi nustatoma *coupled motion*, jei neleidžiama – *prescribed*, kaip pavaizduota 30 paveiksle.



30. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (2)

Paskutiniai nustatymai apibūdinantys judantį objektą yra masės centro koordinatų ir inercijos momentų nustatymas. Šie nustatymai įvedami *Mass Properties* skirtuke, kaip pavaizduota 31 paveiksle.



31. pav. Korpuso judėjimo nustatymai (3)

Laivo masė, svorio centro koordinatės ir inercijos momentai nurodyti du kartu mažesni nei yra iš tiesų. Taip yra todėl, kad programa skaičiavimus atlieka tik vienai katamarano korpuso pusei.

Laivo masės inercijos momentai aplink x, y ir z ašis apskaičiuojamos pagal šias formules:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= \int_M (z^2 + y^2) dm \approx \sum_i m_i (z_i^2 + y_i^2) \\
 I_{yy} &= \int_M (x^2 + z^2) dm \approx \sum_i m_i (x_i^2 + z_i^2), \\
 I_{zz} &= \int_M (x^2 + y^2) dm \approx \sum_i m_i (x_i^2 + y_i^2)
 \end{aligned}
 \tag{4.2.1}$$

čia, I_{xx} – inercijos momentas x ašies projekcijoje;

I_{yy} – inercijos momentas y ašies projekcijoje;

I_{zz} – inercijos momentas z ašies projekcijoje;

x, y, z – laivo masių koordinatės.

Laivo masės inercijos momentas įvertinus hidrodinaminę vandens masę priklausomybė (Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н., 1976):

$$J_{ii} + \lambda_{kk} = MR_{ii}^2, \tag{4.2.2}$$

čia, J_{ii} – Laivo masės inercijos momentas;

λ_{kk} – hidrodinaminė vandens masė;

M – laivo masė;

R_{ii} – laivo masės inercijos spindulys.

Laivo masės inercijos spindulys kinta šešiose ašyse (Journée, et al., 2003):

$$\begin{aligned}R_{xx} &= 0,3B - 0,4B; \\ R_{yy} &= 0,22L - 0,28L; \\ R_{zz} &= 0,22L - 0,28L;\end{aligned}\tag{4.2.3}$$

čia, B – katamarano vieno korpuso plotis;

L – katamarano korpuso ilgis.

Sudarome lygtis pagal kurias apskaičiuojame inercijos momentus apie x, y, z ašis.

$$\begin{aligned}J_{11} &= \frac{M(0,4B)^2}{1,3} = \frac{324730(0,4 \cdot 3,975)^2}{1,3} = 6,315 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \\ J_{22} &= \frac{M(0,28L)^2}{1,3} = \frac{324730(0,28 \cdot 38,64)^2}{1,3} = 2,924 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \\ J_{33} &= J_{22} = 2,924 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;\end{aligned}\tag{4.2.4}$$

čia, J_{ii} – laivo korpuso masės inercijos momentas;

J_{11} – laivo masės inercijos momentas x ašies atžvilgiu;

J_{22} – laivo masės inercijos momentas y ašies atžvilgiu;

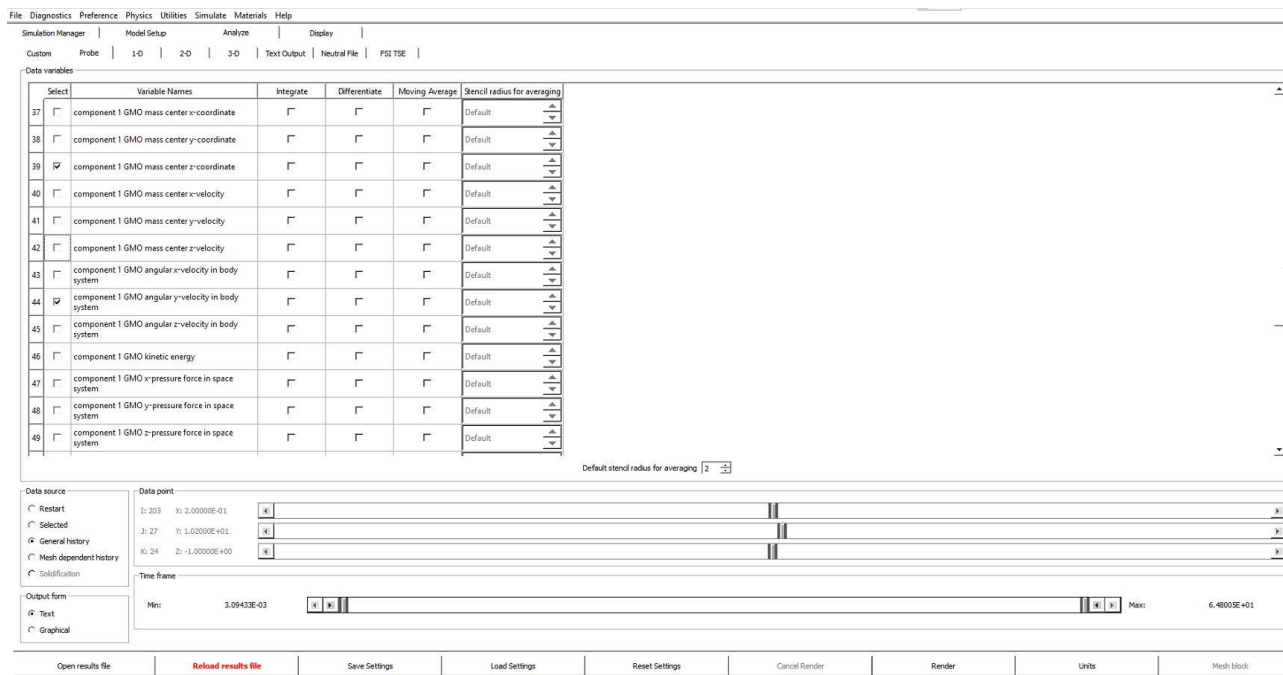
J_{33} – laivo masės inercijos momentas z ašies atžvilgiu.

Linijinė laivo supimosi teorijoje laivo masės inercijos momentai y ir z ašies atžvilgiu yra laikomi vienodi.

Dėl masių paskirstymo laivo korpuse nevertinamo gauti rezultatai gali būti su minimalia paklaida. Minimali todėl, kad masių koncentracijos laive daro tik nedidelę įtaką inercijos momentams KU mokslinių tyrimų laivui „Mintis“.

(11) *Paleidžiama programa – START SIMULATION*

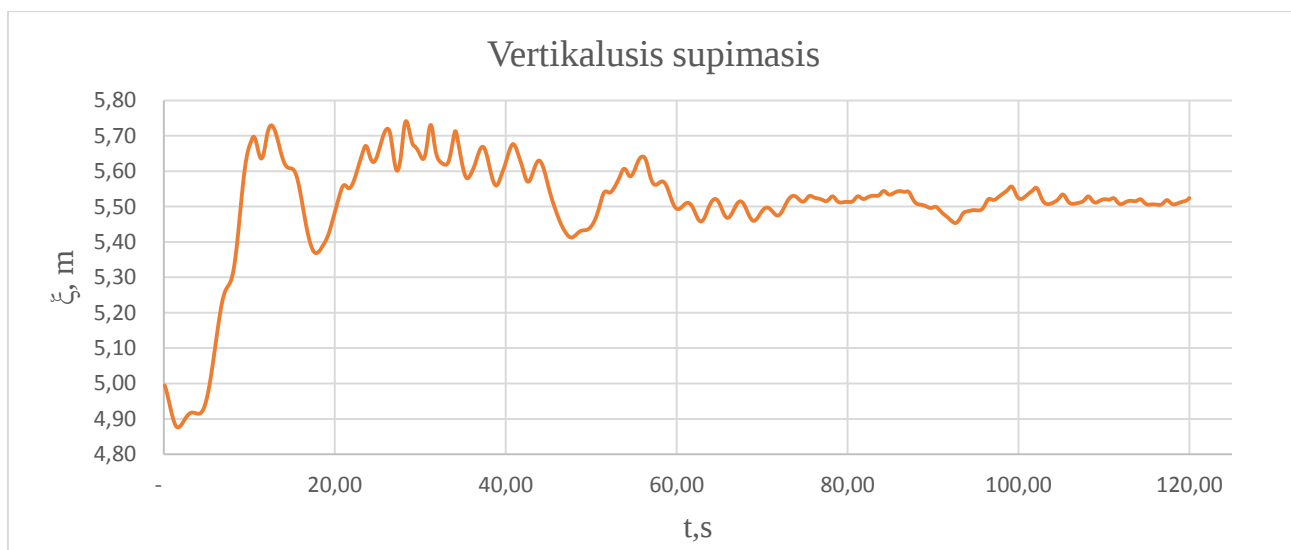
(12) Baigus simuliaciją rezultatų duomenys išgaunami skiltyje (Analyze / Probe), nustačius (*Data source – General history ; Output files – Text*) ir pasirinkus norimus gauti rezultatus pateiktame sąraše. Paspaudus mygtuką *Render* apatinėje užduočių juostoje bus sugeneruoti duomenys, pagal nustatytus kriterijus ir forma. Pavyzdys pavaizduotas 32 paveiksle (kitame puslapyje)



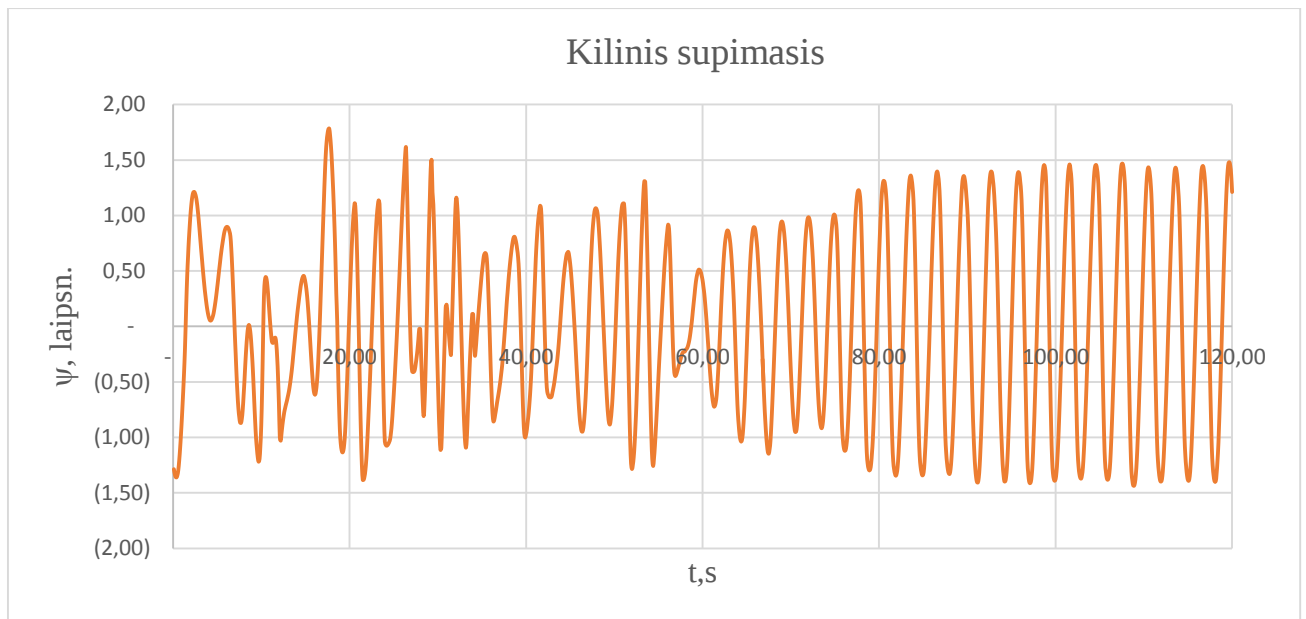
32. pav. Duomenų rezultatų ištraukimas

Gauti grafiniai rezultatai pateikti 33 ir 34 (kai banga – 12 m.), 35 ir 36 (kai banga – 40 m.) paveiksluose, o skaitinės reikšmės – 3 priede. Grafikuose horizontalioji ašis – tyrimo laikas, o vertikalioji – svorio centro koordinatė (vertikaliajam supimuisi) ir posvyrio kampas (kiliniam supimuisi). Grafikuose matyti, kad rezultatai pateikti tik nuo 70 s. Tai yra todėl, kad tik nuo to tyrimo laiko vandens srauto greitis ir kiekis rezultatai nusistovi – tampa stabilūs. Tik tada gaunami patikimi rezultatai.

33 ir 34 paveikslėliuose pateikiamos vertikalios ir kilinio supimosi diagramos iš gautų rezultatų su „FLOW 3D“ programa, kai KU mokslinių tyrimų laivo katamarano greitis – 4,12m/s, bangos ir korpuso susidūrimo periodas – 3 sekundės, bangos ilgis – apie 12,36 m.

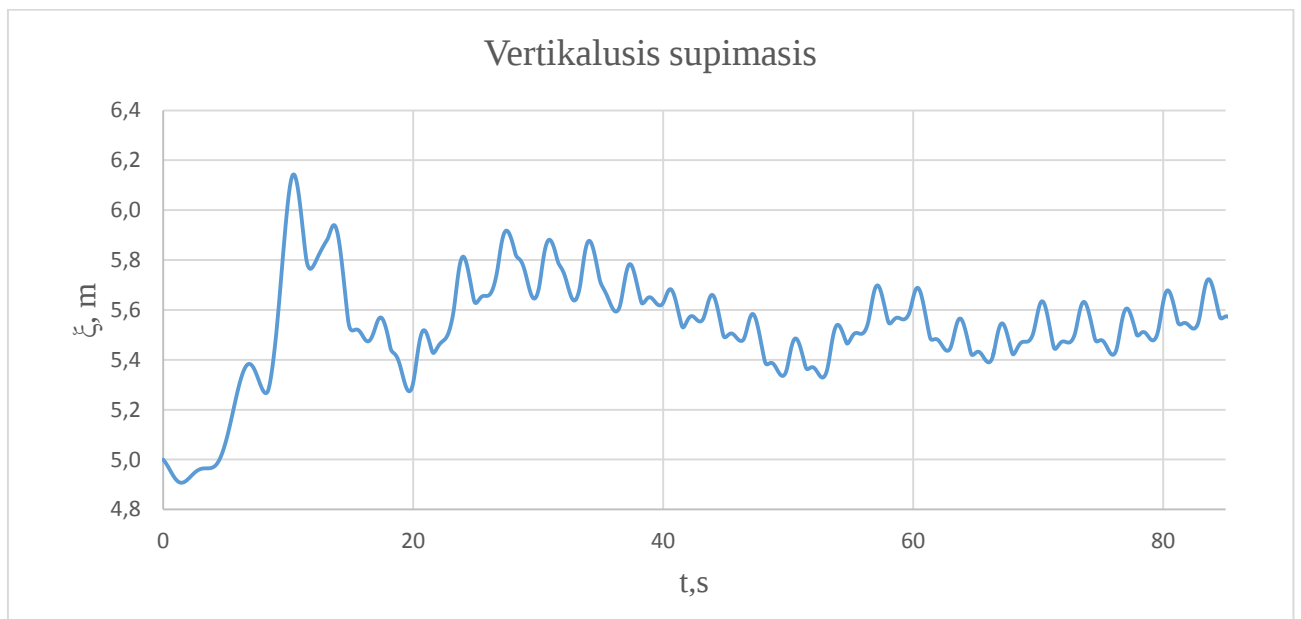


33. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu vertikalios supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.

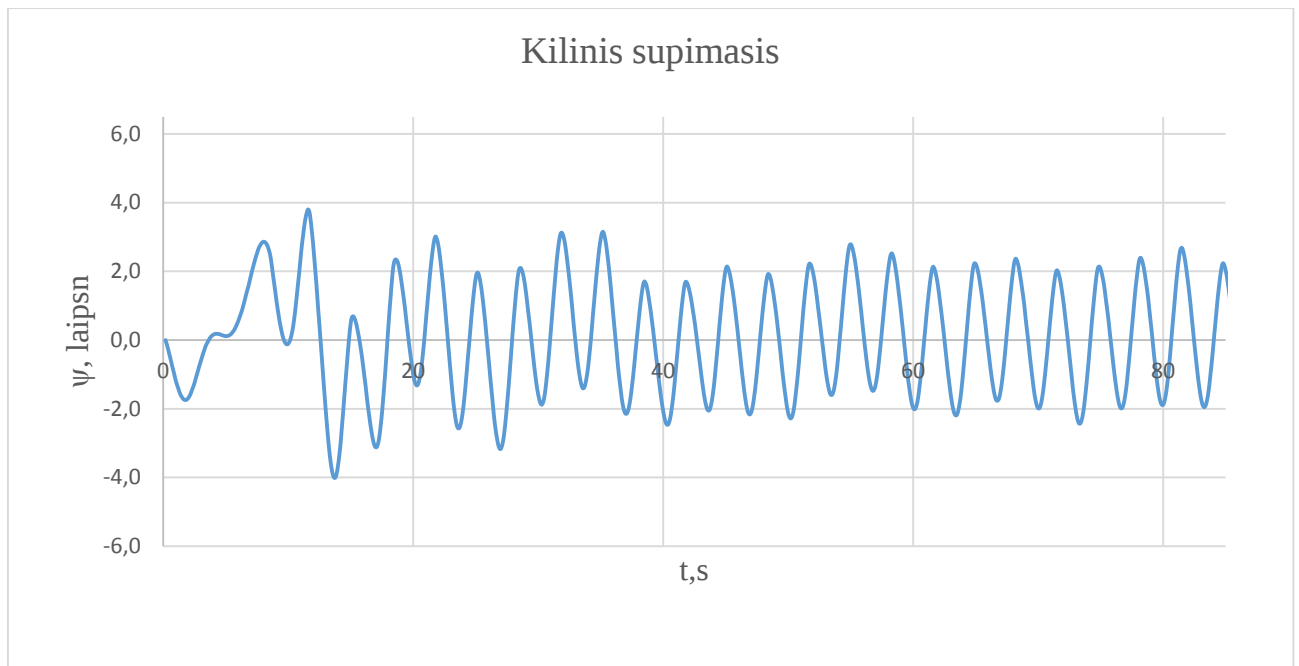


34. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu kilinio supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.

35 ir 36 paveikslėliuose pateikiamos vertikalūs ir kilinio supimosi diagramos iš gautų rezultatų su „FLOW 3D“ programa, kai KU mokslinių tyrimų laivo katamarano greitis – 4,12m/s, bangos ir korpuso susidūrimo periodas – 3 sekundės, bangos ilgis – 40 m. Pastaba: rezultatai skaičiuoti tik 85 s. intervale. Tai atlikta todėl, nes supimasis nusistovi greičiau nei su 12 m. banga.



35. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu vertikalūs supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 40 m.



36. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu kilinio supimosi grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 40 m.

KU mokslinių tyrimų laivo vertikalaus ir kilinio supimosi grafikuose (33 ir 34, 35 ir 36 paveikslai) matyti, kad rezultatai gauti pradžioje labai skirtingi – šokinėjantys. Taip yra todėl, kad skaičiavimų pradžioje (0 s) katamarano korpusas yra stovintis ramiame vandenyje. Pradėjus simuliaciją yra sukelia pirmoji banga, kuri priverčia laivą siūbuoti užduotais nurodytais laisvės laipsniais. Tačiau supimasis nėra cikliškas pačioje pradžioje, nes po pirmosios bangos laivas buvo išvestas iš nusistovėjusios pusiausvyros padėties. Simuliacijos laikui bėgant pastovus bangavimas susidurdamas su korpuso jį priverčia cikliškai siūbuoti, rezultatai tampa panašūs tam tikrame diapazone. Tik tokie rezultatai gali būti vertinami, todėl tik dalis rezultatų šiame darbe bus analizuojami ir vertinami.

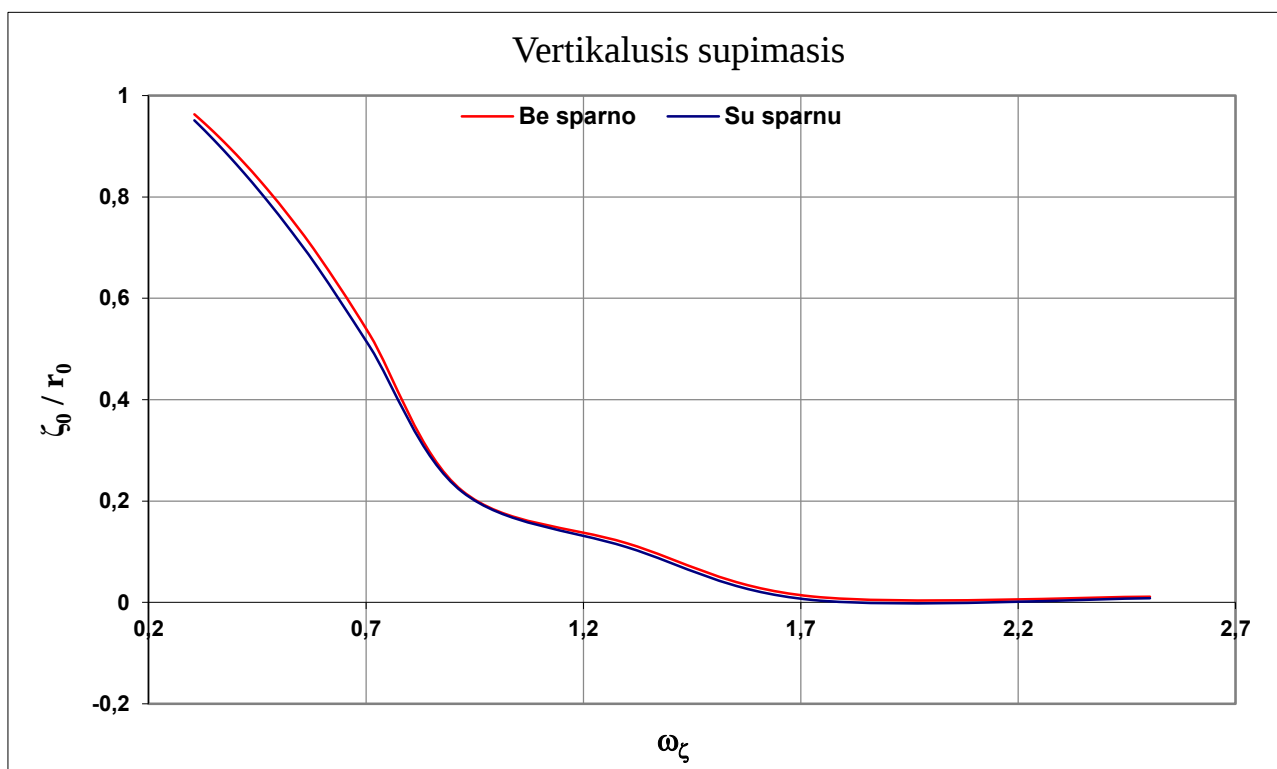
D. Lubio baigiamajame darbe nagrinėjamas KU mokslinių tyrimų laivo išilginis supimasis be povandeninio sparno tik 1 bangai – 12 m. ilgio. Tačiau autorius taip pat prognozavo, kad katamarano didžiausias išilginis supimasis bus kai bangos ilgis – 40 m. Didžiausias šiuo atveju reiškia dažnio ir supimosi dydžio santykį. 40 m. banga yra beveik tokio pat ilgio kaip ir KU mokslinių tyrimų laivas. Banga pernešdama vandenį per korpuso ilgį pradžioje pakelia tik laivapriekį, kol nepasiekia laivo svorio centro. Kai banga atsiduria už laivo svorio centro, laivapriekis nuo svorio jėgos pradeda kristi iš inercijos ir susiduria su vandens paviršiumi. Kadangi banga yra tokio pat ilgio kaip ir korpusas, susidūrimo su vandens paviršiumi metu laivas vėl susiduria su sekančia banga. Tokios sąlygos maksimaliai stabdo laivą ir sukelia didžiausias jėgas.

5. GAUTŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

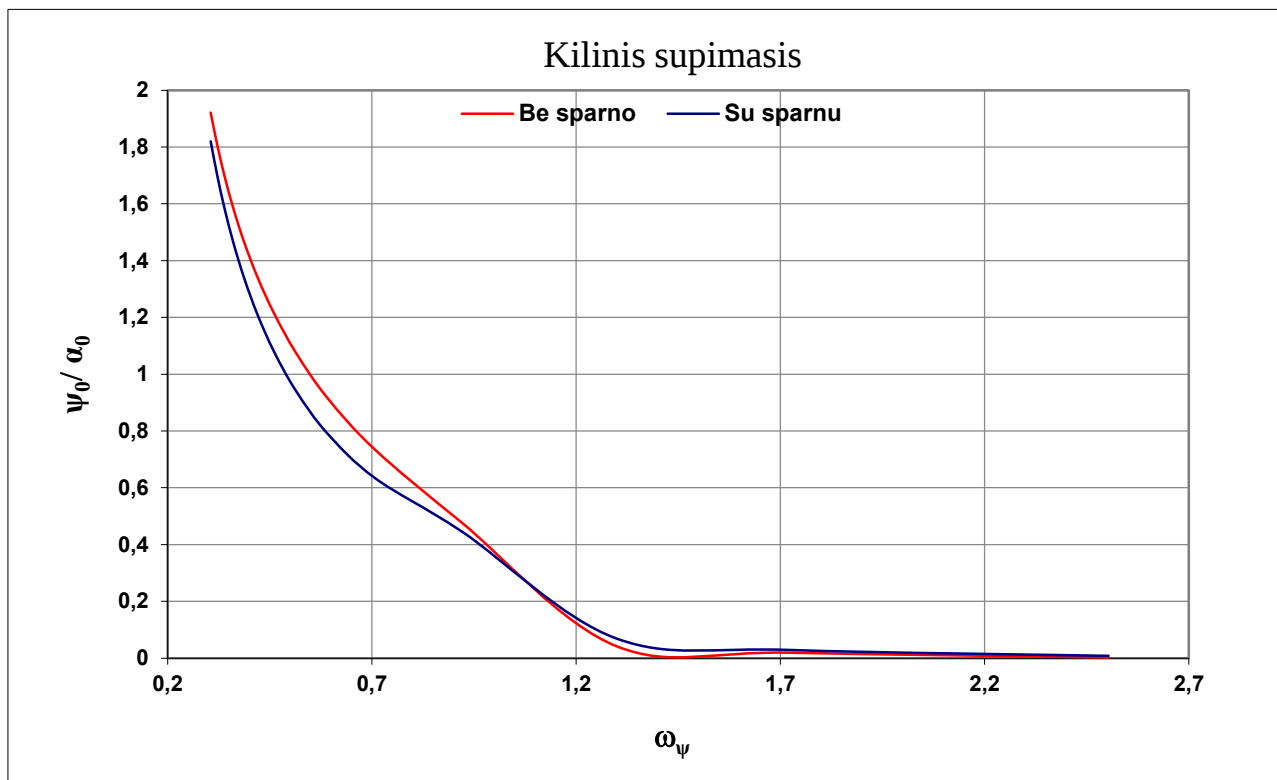
Šiame skyriuje bus nagrinėjami gauti rezultatai ir lyginami su Lubys D. 2016 m., „KU mokslinių – tyrimų laivo kilinio ir vertikalaus supimosi tyrimai naudojant CFD programinę įrangą“ baigiamojo darbo gautais rezultatais su tikslu nustatyti KU mokslinių tyrimų laivo povandeninio sparno efektyvumą, kai sąlygos ir parametrai buvo užduotos lygiai tokios pat kaip ir Lubys D. tiriamajame darbe.

Linijinio supimosi tyrimas naudojant Excel sukurta programą:

37 ir 38 grafikuose pateiktos grafinės KU mokslinių tyrimų laivo vertikalaus ir kilinio supimosi charakteristikos be povandeninio sparno ir su parinktu povandeniniu sparnu. Šie rezultatai gauti skaičiuojant linijine supimosi teorija naudojant Djačkov V. sukurta linijinio supimosi tyrimo programa sumodeliuota su MS Excel.



37. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivapriekiniu sparnu ir be jo vertikalaus supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.



38. pav. KU mokslinių tyrimo laivo – katamarano su pasyviu laivaprieikiniu sparnu ir be jo kilinio supimosi amplitudinės – dažninės charakteristikos.

Analizuojant vertikalios supimosi grafiką matyti, kad supimasis be povandeninio sparno ir su povandeniniu sparnu yra labai panašus – kreivės ko ne užstoja viena kitą, tačiau pastebima, kad kreivė, kuri identifikuoja vertikalųjį supimąsi su povandeniniu sparnu yra žemiau, nei vertikalios supimosi kreivė be povandeninio sparno, o tai reiškia kad povandeninis sparnas slopina vertikalųjį supimąsi tačiau labai silpnai. Povandeninio sparno vertikalios supimosi efektyvumo analizė atliekama toliau su skaitinėmis reikšmėmis.

Analizuojant kilinio supimosi grafikus pastebima, kad kreivės identifikuojančios supimąsi be povandeninio sparno ir su povandeniniu sparnu, kur kas labiau nutolusios nei vertikalios supimosi kreivės. Kreivė, kuri identifikuoja kilinį laivo supimąsi su povandeniniu sparnu yra kur kas žemiau nei kreivė identifikuojanti laivo supimąsi be povandeninio sparno, o tai reiškia kad povandeninio sparno supimosi slopinimas yra kur kas efektyvesnis kiliniam supimuisi, nei vertikaliam supimuisi. Tačiau pastebima, kad prie didesnio supimosi dažnio ($\omega_\psi > 1,1$) kilinio supimosi kreivės susikerta ir didėjant supimosi dažniui apsikeičia pozicijomis (kreivė, identifikuojanti kilinį supimąsi su povandeniniu sparnu, atsiduria aukščiau kreivės, kuri parodo supimąsi be povandeninio sparno), o tai reiškia, kad prie didesnių supimosi dažnių (trumpesnių bangų) sparnas ne tik, kad neslopina KU mokslinių tyrimų laivo kilinio supimosi, bet ir darys neigiamą darbą – padidins kilinį supimąsi. Tačiau negalime ignoruoti fakto, kad tada kilinio

supimosi posvyrio kampas yra toks mažas, kad esminės reikšmės gali ir neturėti. Povandeninio sparno kilinio supimosi efektyvumo analizė atliekama toliau su skaitinėmis reikšmėmis.

10 lentelėje pateikiami KU mokslinių tyrimų laivo su ir be povandeninio sparno linijinės teorijos pargindu sukurtos programos vertikalios ir kilinio supimosi charakteristikų rezultatai.

10. Lentelė. Vertikalios ir kilinio supimosi slopinimo našumo skaičiavimo rezultatai.

λ, m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	40	30	20	12
ω_{ζ}	0,305	0,321	0,340	0,361	0,387	0,420	0,460	0,515	0,591	0,708	1,069	1,299	1,726	2,503
$\zeta_0, \text{m (be sparno)}$	5,900	5,459	5,005	4,536	4,051	3,546	3,016	2,451	1,838	1,145	0,187	0,127	0,010	0,006
$\zeta_0, \text{m (su sparnu)}$	5,827	5,382	4,926	4,456	3,969	3,464	2,935	2,375	1,770	1,094	0,192	0,119	0,004	0,005
$\eta_v, \%$	1,242	1,394	1,570	1,777	2,022	2,317	2,677	3,123	3,696	4,478	-2,06	6,607	57,73	26,59
$\psi_0, \text{laipsn (be sparno)}$	14,12	13,59	13,05	12,49	11,91	11,29	10,61	9,831	8,872	7,624	3,624	0,544	0,276	0,042
$\psi_0, \text{laipsn (be sparno)}$	13,38	12,78	12,17	11,54	10,88	10,18	9,437	8,603	7,659	6,584	3,891	0,898	0,415	0,133
$\eta_k, \%$	5,266	5,948	6,730	7,627	8,654	9,820	11,11	12,48	13,66	13,63	-6,86	-64,8	-50,4	-218

Vertikaliam supimuisi su povandeniniu sparnu našumui nustatyti naudosime formulę:

$$\eta_v = \frac{\zeta_0(\text{su sparnu}) - \zeta_0(\text{be sparno})}{\zeta_0(\text{su sparnu})} \cdot 100\%$$

$$\eta_{v300} = \frac{5,9 - 5,827}{5,9} \cdot 100 = 1,242\%$$

Tai reiškia, kad kilinio supimosi slopintuvo efektas yra teigiamas ir jo našumas – supimosi slopinimas yra 1,242% dydžio, kai bangos ilgis – 300m, o katamarano greitis 4,12m/s. Skaičiavimai su kitų bangų ilgiais atlikti analogiškai ir pateikti 10 lentelėje.

Kilinio supimosi formulė yra analogiškai:

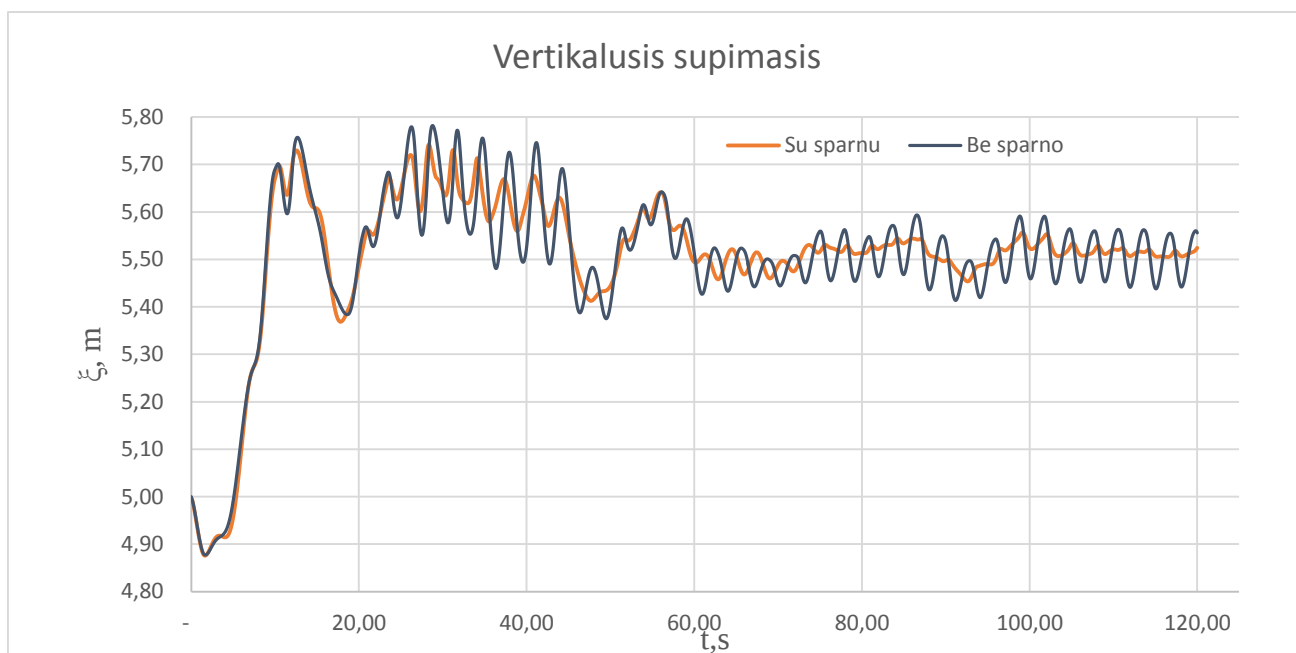
$$\eta_k = \frac{\zeta_0(\text{su sparnu}) - \zeta_0(\text{be sparno})}{\zeta_0(\text{su sparnu})} \cdot 100\%$$

$$\eta_{k300} = \frac{14,12 - 13,38}{14,12} \cdot 100 = 5,266\%$$

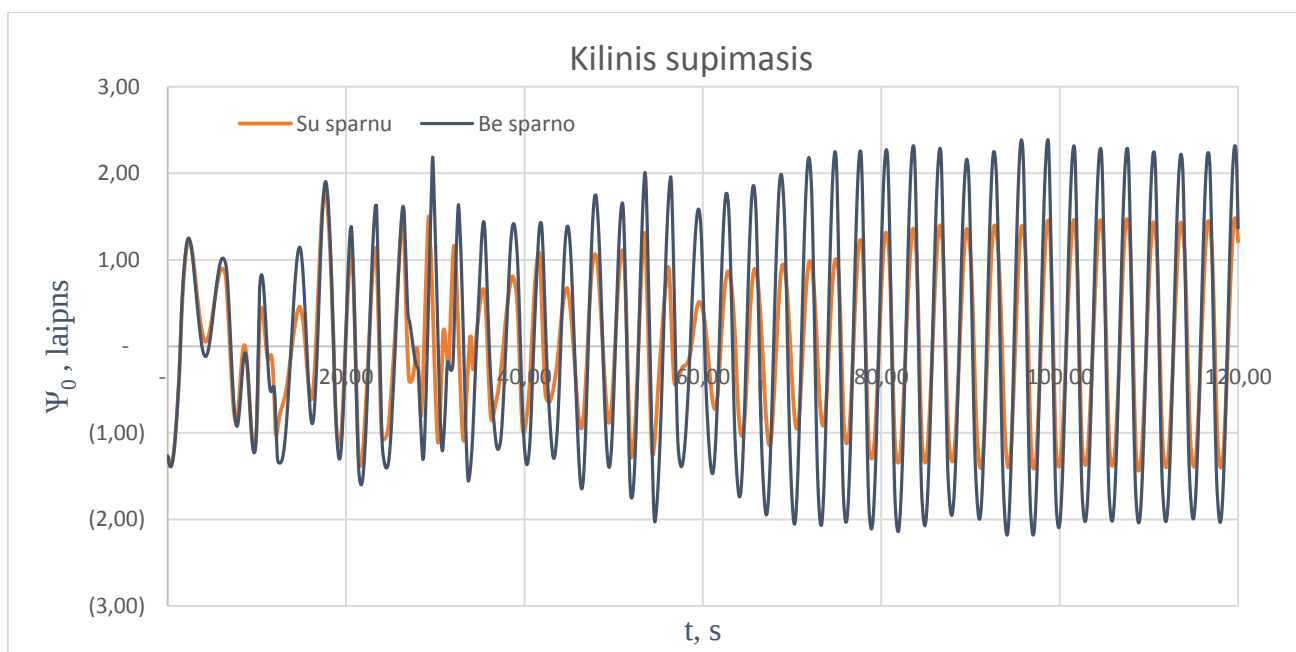
Kilinis supimasis sumažėja su povandeniniu sparnu, kai bangos ilgis 300m, o katamarano greitis 4,12m/s. Skaičiavimai su kitais bangų ilgiais atlikti analogiškai ir pateikti 10 lentelėje.

Linijinio supimosi tyrimas naudojant „FLOW 3D“ programą:

39 ir 40 grafikuose pateikti vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatai be povandeninio ir su povandeniniu sparnu, naudojant „Flow 3D“ programą. Skaitiniai rezultatai su ir be povandeninio sparno pateikti 3 priede.



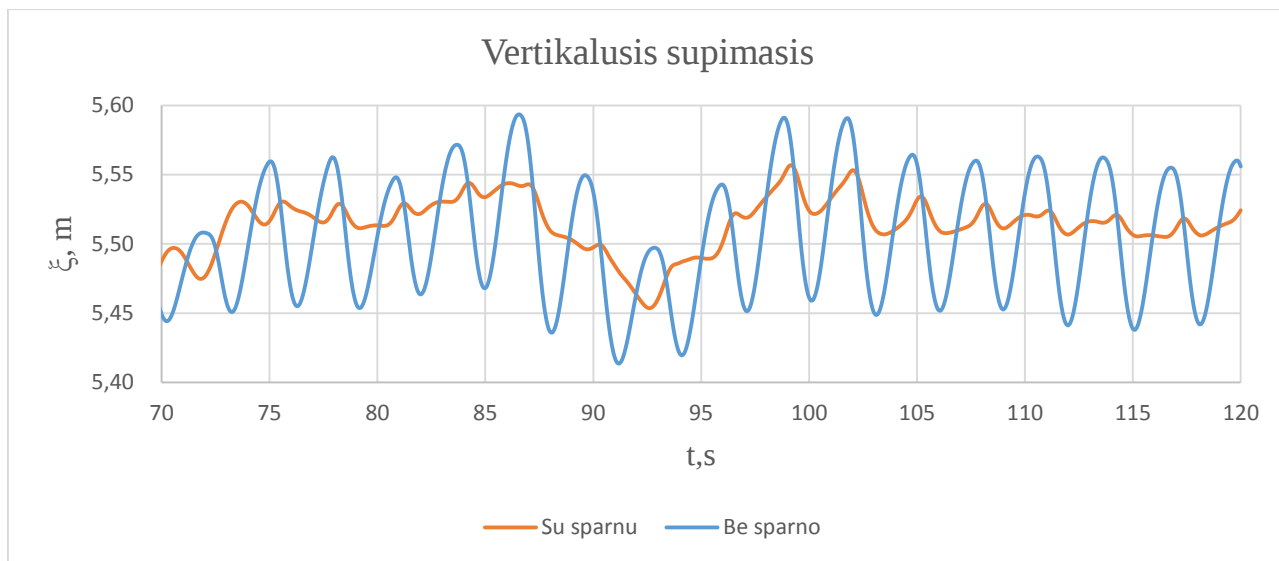
39. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno vertikalaus supimosi „FLOW 3D“ grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.



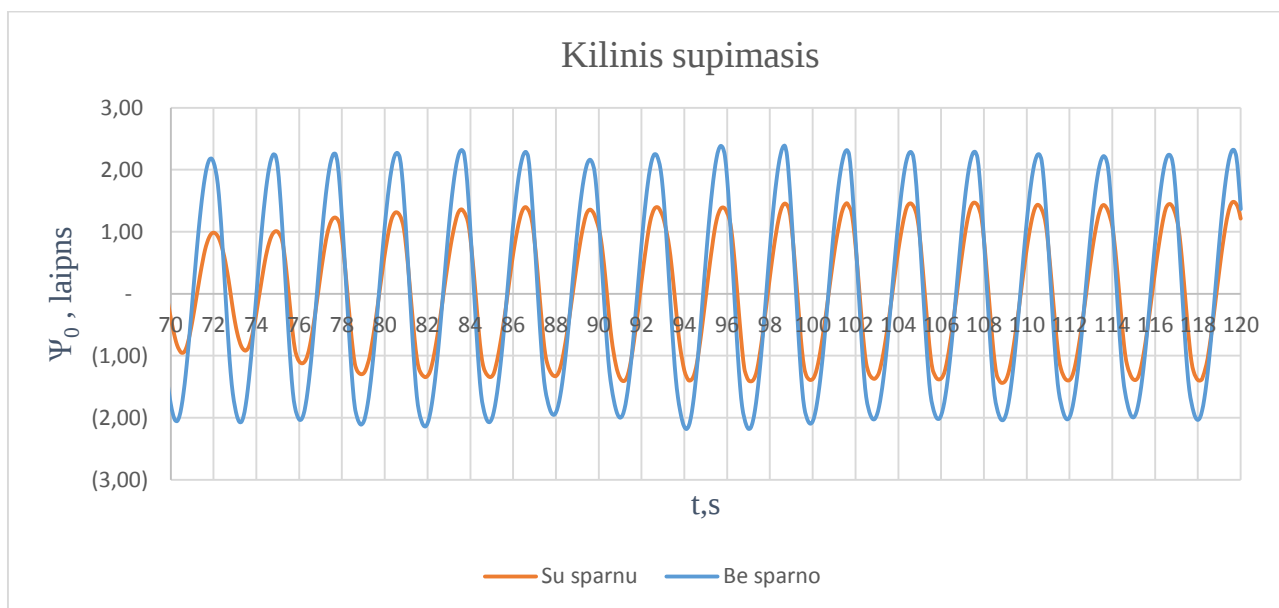
40. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno kilinio supimosi „FLOW 3D“ grafiniai rezultatai, kai bangos ilgis – 12 m.

Matome, kad rezultatai cikliška pradeda kartotis tik nuo 70s., todėl duomenys bus vertinami nuo šio periodo iki likusio periodo pabaigos (grafikai pateikti 41 ir 42 paveikslėliuose). Šioje programoje užduotos sąlygos 2 bangos ilgiams ($\lambda = 12m$ ir $\lambda = 40m$), bet duomenys analizuojami kitu būdu – vertinama vidutinė supimosi amplitudė KU mokslinių tyrimų laivui su povandeniniu sparnu ir lyginama su rezultatais gautais analizuojant laivą be povandeninio sparno. 12 m. ilgio bangos rezultatai be povandeninio sparno paimti iš D. Lubio darbo, o 40 m. bangos ilgiui skaičiavimai buvo atlikti papildomai ir su povandeniniu sparnu ir be jo.

Pateikiami analizuojamų vertikalios ir kilinio supimosi duomenų grafikai:



41. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ vertikalios supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 12 m.



42. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ kilinio supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 12 m.

Duomenų analizei pirmiausia reikia atrinkti pikines didžiausias ir mažiausias reikšmes – ekstremumus, kai bangos ilgis 12 m. Šios reikšmės pateiktos 11 lentelėje.

11. Lentelė. Vertikalaus ir kilinio supimosi ekstremumų reikšmės

<i>n</i>	ε, m (be sparno)	ε, m (su sparnu)	ψ_0 , laipsn. (be sparno)	ψ_0 , laipsn. (su sparnu)
1	5,44	5,50	-2,05	- 0,95
2	5,51	5,48	2,18	0,98
3	5,45	5,53	-1,27	-0,92
4	5,56	5,52	2,25	1,01
5	5,45	5,53	-2,03	-1,12
6	5,56	5,52	2,25	1,20
7	5,45	5,53	-2,11	-1,29
8	5,55	5,51	2,27	1,31
9	5,46	5,53	-2,14	-1,35
10	5,57	5,52	2,32	1,36
11	5,47	5,54	-2,07	-1,34
12	5,59	5,53	2,29	1,40
13	5,44	5,54	-1,95	-1,33
14	5,55	5,46	2,16	1,36
15	5,41	5,56	-2,00	-1,41
16	5,50	5,52	2,25	1,40
17	5,42	5,56	-2,18	-1,40
18	5,54	5,51	2,39	1,39
19	5,45	5,53	-2,18	-1,41
20	5,59	5,51	2,38	1,46
21	5,46	5,53	-2,10	-1,39
22	5,59	5,51	2,32	1,46
23	5,45	5,52	-2,02	-1,37
24	5,56	5,51	2,29	1,46
25	5,45	5,50	-2,02	-1,38
26	5,56	5,52	2,29	1,47
27	5,45	5,51	-2,04	-1,44
28	5,56	5,52	2,24	1,43
29	5,44		-2,03	-1,40
30	5,56		2,22	1,43
31	5,44		-1,99	-1,39
32	5,55		2,23	1,45
33	5,44		-2,04	-1,40
34	5,56		2,32	1,48

Atliekama vertikalaus supimosi rezultatų analizę. Surinktos reikšmės 15 lentelėje antrame ir trečiame stulpeliuose yra koordinatės padėtyis pikiniame grafiko taške. Analizei reikia nustatyti atstumą, kurį laivo centro koordinatė pakyla iki aukščiausio taško ir nusileidžia iki žemiausio taško, kiekviename cikle ir šių rezultatų vidurkis bus vidutinė vertikalaus supimosi reikšmė.

Vertikalaus supimosi be povandeninio sparno vidutinė supimosi reikšmė nustatoma pagal formulę:

$$\varepsilon_{vid.b.s.12} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_4 - \varepsilon_3) + \dots + (\varepsilon_{34} - \varepsilon_{33})}{n/2} = \frac{(5,51 - 5,44) + (5,56 - 5,45) + \dots + (5,56 - 5,44)}{17} = 0,11m$$

Vertikalaus supimosi su povandeniniu sparnu vidutinė supimosi reikšmė nustatoma pagal formulę:

$$\varepsilon_{vid.s.s.12} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) + \dots + (\varepsilon_{27} - \varepsilon_{28})}{n/2} = \frac{(5,50 - 5,48) + (5,53 - 5,52) + \dots + (5,52 - 5,51)}{14} = 0,0235m$$

Našumo nustatymui lyginsime vertikalaus supimosi amplitudes be povandeninio sparno ir su povandeniniu sparnu. Skaičiuojamas povandeninio sparno našumas vertikaliam supimuisi:

$$\eta_{v.12} = \frac{(\varepsilon_{vid.b.s} - \varepsilon_{vid.s.s})}{\varepsilon_{vid.b.s}} \cdot 100\% = \frac{(0,11 - 0,0235)}{0,11} \cdot 100\% = 78,8\%$$

Toliau atliekama kilinio supimosi analizė. 11 lentelėje pateikti kilinio supimosi rezultatai (4 ir 5 stulpeliai) yra korpuso pokrypio kampas horizontaliosios ašies atžvilgiu. 38 paveiksle pateiktame grafike ekstremumų reikšmės yra ir neigiamos, ir teigiamos. Analizuojant šias reikšmes reikia apskaičiuoti bendrą supimosi amplitudes kampą kiekvieno ciklo metu ir išvedus gautų rezultatų vidurkį gausime vidutinę kilinio supimosi reikšmę.

Kilinio supimosi be povandeninio sparno reikšmė skaičiuojama pagal formulę:

$$\psi_{0.vid.b.s.12} = \frac{(\psi_{02} - \psi_{01}) + (\psi_{04} - \psi_{03}) + \dots + (\psi_{34} - \psi_{33})}{n/2} = \frac{(2,18 - (-2,05)) + (2,25 - (-1,27)) + \dots + (2,32 - (-2,04))}{n/2} = 4,28^\circ$$

Kilinio supimosi su povandeniniu sparnu reikšmė skaičiuojama analogiškai:

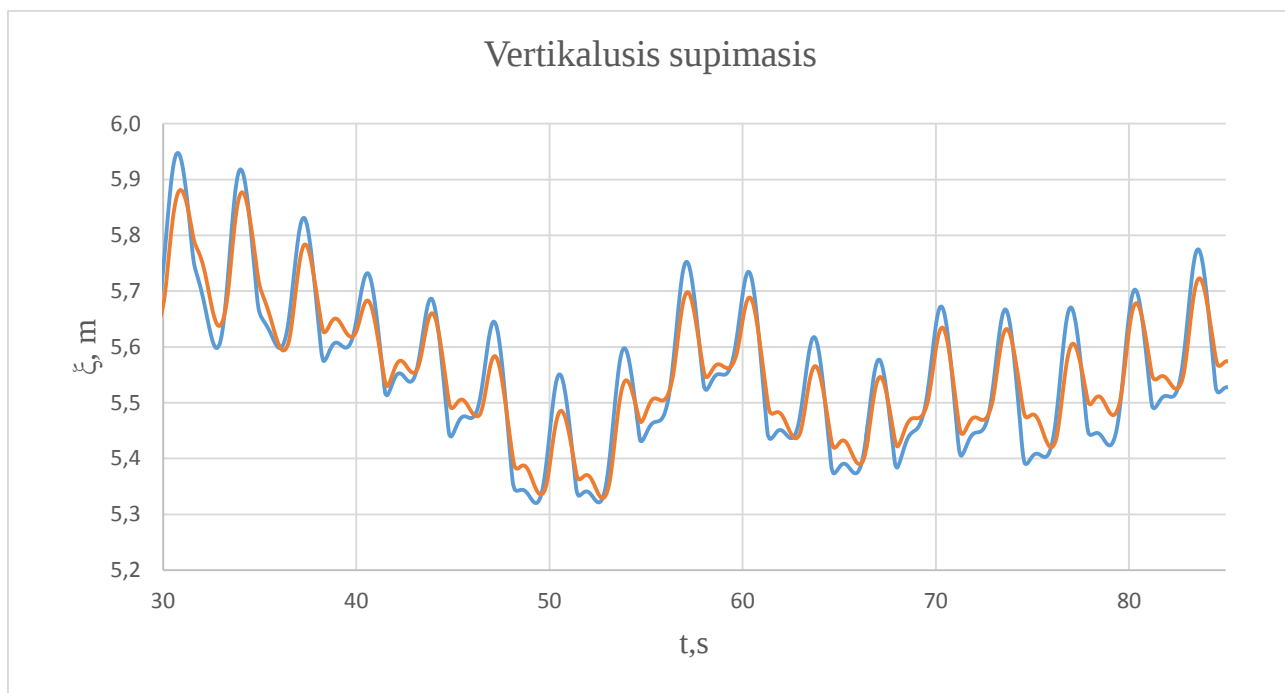
$$\psi_{0.vid.s.s.12} = \frac{(\psi_{02} - \psi_{01}) + (\psi_{04} - \psi_{03}) + \dots + (\psi_{34} - \psi_{33})}{n/2} = \frac{(0,98 - (-0,95)) + (1,01 - (-0,92)) + \dots + (1,48 - (-1,40))}{n/2} = 2,67^\circ$$

Povandeninio sparno kilinio supimosi slopinimo našumas nustatomas analogiškai kaip ir vertikaliam supimuisi:

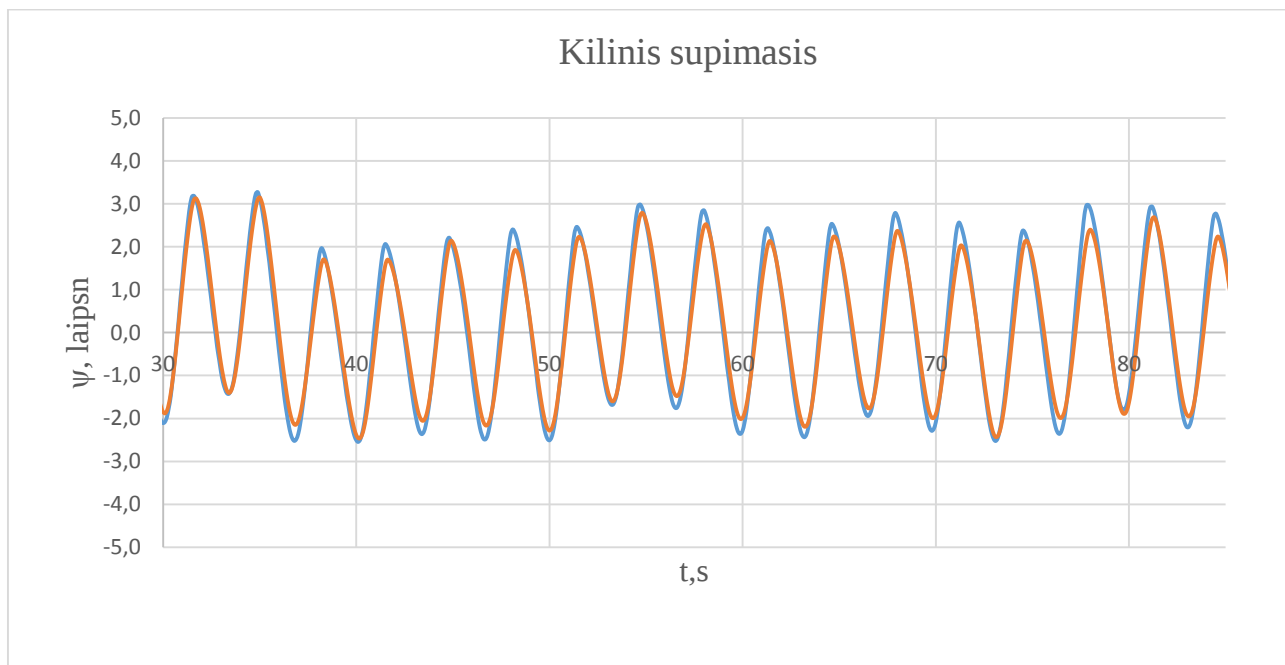
$$\eta_{k.12} = \frac{(\psi_{0.vid.b.s.12} - \psi_{0.vid.s.s.12})}{\psi_{0.vid.b.s.12}} \cdot 100\% = \frac{(4,28 - 2,67)}{4,28} \cdot 100\% = 37,8\%$$

Skaičiavimai atliekami analogiškai, kai bangos ilgis – 40 m.:

Pateikiami vertikalaus ir kilinio supimosi grafikai (43 ir 44 pav.) KU mokslinių tyrimo laivo be ir su povandeniniu sparnu, kai bangos ilgis – 40 m.



43. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ vertikalaus supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 40 m.



44. pav. KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno analizuojami „FLOW 3D“ kilinio supimosi duomenys, kai bangos ilgis – 40 m.

Pastaba: 40 m. ilgio bangos tyrimų rezultatai šiame darbe nepateikiami, dėl ekonominių sumetimų.

Vertikalaus supimosi be povandeninio sparno vidutinė supimosi reikšmė, kai bangos ilgis 40 m.:

$$\varepsilon_{vid.b.s.40} = \frac{(5,94 - 5,59) + (5,91 - 5,58) + \dots + (5,52 - 5,40)}{17} = 0,58m$$

Vertikalaus supimosi su povandeniniu sparnu vidutinė supimosi reikšmė, kai bangos ilgis 40 m.:

$$\varepsilon_{vid.s.s.40} = \frac{(5,88 - 5,64) + (5,88 - 5,59) + \dots + (5,57 - 5,42)}{17} = 0,51m$$

Povandeninio sparno vertikalaus supimosi našumas, kai bangos ilgis 40 m.:

$$\eta_{v.40} = \frac{(\varepsilon_{vid.b.s} - \varepsilon_{vid.s.s})}{\varepsilon_{vid.b.s}} \cdot 100\% = \frac{(0,58 - 0,51)}{0,58} \cdot 100\% = 11,7\%$$

Kilinio supimosi be povandeninio sparno reikšmė skaičiuojama pagal formulę:

$$\psi_{0.vid.b.s.40} = \frac{(3,18 - (-2,10)) + (3,27 - (-1,43)) + \dots + (2,77 - (-2,36))}{17} = 4,97^\circ$$

Kilinio supimosi su povandeniniu sparnu reikšmė, kai bangos ilgis 40 m.:

$$\psi_{0.vid.s.s.40} = \frac{(3,12 - (-1,88)) + (3,15 - (-1,41)) + \dots + (2,27 - (-1,99))}{17} = 4,43^\circ$$

Povandeninio sparno kilinio supimosi slopinimo našuma, kai bangos ilgis 40 m.:

$$\eta_{k.40} = \frac{(\psi_{0.vid.b.s.40} - \psi_{0.vid.s.s.40})}{\psi_{0.vid.b.s.40}} \cdot 100\% = \frac{(4,97 - 4,43)}{4,97} \cdot 100\% = 10,8\%$$

Nustatytas povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi slopinimo našumas skaičiuojant linijinės teorijos metodu naudojant MS Excel sukurta programa ir su skaičiuojamąja skysčių dinamikos programa FLOW 3D. Apskaičiuoti našumų rezultatai pateikti 12 lentelėje.

12. Lentelė. Povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi slopinimo našumų rezultatai

Programos/ metodo pavadinimas	Vertikalaus supimosi slopinimas, %	Kilinio supimosi slopinimas, %
Kai bangos ilgis – 12 m.		
Linijinio supimosi tyrimo metodu	26,59	-218
FLOW 3D programa	78,8	37,8

Kai bangos ilgis – 40 m.		
Linijinio supimosi tyrimo metodu	-2,06	-6,86
FLOW 3D programa	11,7	10,8

Linijinio supimosi tyrimu naudojant MS Excel programa ir FLOW 3D programa rezultatai skiriasi nemažu skirtumu. Taip gali būti dėl programų skaičiavimo principo, skirtingos bangos formos, programų tikslumo ir t.t.

KU mokslinių tyrimų laivas – katamaranas buvo tiriamas prie užduotų sąlygų: greitis – 4,12m/s ; bangos ilgis – 12 ir 40 metrų ; bangos aukštis – 0,55 ir 2,7 metro ; priekinėje laivo dalyje įrengtas 2 m. pločio supimosi slopintuvas – povandeninis sparnas.

Atlikus apskaičiuotų rezultatų analizę matoma, kad tiek vertikalaus supimosi, tiek kilinio supimosi dydžiai yra labai maži: vertikalaus supimosi – 0,02 - 0,11 metro, o kilinio supimosi – 2 - 4 laipsniai, kai bangos ilgis – 12 m. Kas iš esmės nesudaro didelio pasipriešinimo, diskomforto ir pan. nagrinėjamam KU mokslinių tyrimų laivui plaukiant numatytais sąlygomis. Taip pat tokiaime mažame vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatų diapazone galima tikėtis ir didesnės paklaidos tiriant skirtingomis programomis, kai jų skaičiavimų algoritmai yra pagrįsti linijine laivo supimosi teorija. Taip pat nustatyta, kai bangos ilgis 40 m. ir apskaičiuota, kad vertikalusis supimas yra apie 0,5 m., o kilinis – apie 5 laipsniai.

Povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi slopinimo efektas akivaizdžiai skiriasi skaičiuojant skirtingomis programomis. Linijine teorija skaičiavimo rezultatai gaunami neigiami, o skaičiuojamąją skysčių dinamikos programa „FLOW 3D“ teigiamas. Tai reiškia kad linijine teorija apskaičiuota, kad povandeninis sparnas ne slopins, o stiprins supimasi, o su „Flow 3D“ apskaičiuota – kad slopins. Vis dėl to FLOW 3D programa sukurta – pritaikyta masės, momentų ir srautą veikiančių jėgų skaičiavimų, kurių atstojamosios yra proporcingai lygios kūną veikiančioms jėgoms. Programa sumodeliuota kuo tiksliau atgaminti nurodytas sąlygas ir imituoti tiriamo kūno elgseną, todėl laikome, kad šia programa gauti rezultatai yra tikslesni sudarytos užduoties skaičiavimams.

Ištirta, kad KU mokslinių tyrimų laivas – katamaranas su povandeniniu sparnu supasi mažiau tiek vertikaliu, tiek kiliniu supimuosi. Įrodytas povandeninio sparno efektyvumas prie užduotų laivo plaukimo ir bangavimo sąlygų.

IŠVADOS

1. Atlikus mokslinių darbų analizę nustatyta kad, atliktas ne vienas eksperimentas išilginio supimosi tyrimams, parametrų duomenų koreliavimo analizės tikslais ir povandeninio sparno darbo ir efekto nagrinėjimui. Tačiau dauguma autorių analizuoja ne greitaeigius katamaranus, o tik vidutinio greičio, todėl būtina atlikti greitaeigio katamarano stabilizavimo tyrimus. Nustatyta, kad šiuos tyrimus pakankamai tiksliai būtų galima įvertinti naudojant CFD metodika veikiančią programą „FLOW 3D“. Linijinė išilginio supimosi teorija yra viena iš variantų, galimų katamarano supimosi sąlygų tyrimams.
2. Išragrinėjus galimas katamarano stabilizavimo priemones parinktas hidrodinaminis stabilizatorius – povandeninis laivapriekinis sparnas. Toks sprendimas buvo padarytas ekonominiais sumetimais, konstrukcijos paprastumu ir tvirtinimo – įrengimo vietos galimybėmis. Taip pat aprašytos katamarano sparno teorinės projektavimo formulės, kuriomis galima apskaičiuoti katamarano povandeninio sparno dydžius ir numatyti konstrukciją, kai žinomos laivo ir bangos charakteristikos.
3. Aprašyta linijinė laivo supimosi teorija ir surašytos pagrindinių dedamųjų lygtys – inercinės, Dempferavimo, atstatomosios ir sužadinamosios jėgos. Šios dedamosios yra kintančios dėl korpusų sąveikos, todėl siekiant įvertinti prijungtosios masės priklausomybę nuo horizontalaus klirseno, įvedamas prijungtosios masės koeficientas. Užrašytos lygtys, kuriomis patogų tirti katamaranų supimasį. Nustatyta, kad šiomis lygtimis gauti rezultatai yra pakankamai patikimi ir leidžia išanalizuoti katamarano supimosi pobūdį ir supimosi charakteristikas.
4. Atlikta linijinės laivo išilgino supimosi stabilizavimo teorijos analizė ir nustatyta, kad išilginis supimasis sudarytas iš kilino, vertikalaus ir horizontalaus supimosi sudedamųjų. Aprašoma, kad horizontalusis supimasis, palyginus su kitais dviem, yra toks mažas, kad skaičiavimuose, net nevertinamas. Atlikta bangos analizė ir parodytos jos komponentės – kuriomis sudaromos jūrinės sąlygos išilginio supimosi nagrinėjimui. Surašytos Djačkov V. vandens prijungtosiomis masėmis, sužadinamosiomis jėgomis ir Dempferavimo koeficientais papildytos kilinio ir vertikalaus supimosi lygtys, kurios leidžia tiksliau apskaičiuoti katamarano vertikalųjį ir kilinį supimasį. Šios universalios lygtys tinkamos analizuoti vertikalųjį ir kilinį supimasį esant reguliariam – cikliniam bangavimui arba kitaip linijine išilginio supimosi teorija.

5. Atlikti KU mokslinių – tyrimų laivo su supimosi slopintuvu vertikalaus ir kilinio supimosi skaičiavimai naudojant linijinę laivo supimosi teoriją įvairioms bangų dažninėms charakteristikoms. Rezultatai pateikti 2 priede. Iš šių rezultatų sudaryti 20 ir 21 pav. vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybių nuo dažnių vertikalaus ir kilinio supimosi parametrų. Taip pat sudarytas 18 grafikas laivo supimosi fazėms ant bangos įvairiais laiko momentais vertinti ir laivo denio užliejimo grafikas (žr. 19 pav.). Tiriant 12m. ilgio ir 0,55m. auščio bangomis, kai laivo greitis 4,12m/s, apskaičiuota, kad vertikalaus supimosi amplitudės dydis – 0,005m., o supimosi kampas – 0,13 laipsn.
6. Apskaičiuotas KU mokslinių – tyrimų laivo su supimosi slopintuvu išilginis supimas naudojant CFD programinę įrangą. Rezultatai vertinami tik nuo 70 sekundės, nes tik tada rezultatai pradeda cikliškai kartotis, o tai reiškia, kad tik tada rezultatų vertinimas bus tikslingas.

Gautų rezultatų analizė atliekama vertinant vertikalųjį ir kilinį supimą KU mokslinio tyrimo laivui su povandeniniu sparnu ir be jo dviem skirtingomis programomis: MS excell patikslintomis linijinės teorijos formulėmis sukurta programa ir „FLOW 3D“ skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa. FLOW 3D diagramose KU mokslinių tyrimo laivo su povandeniniu sparnu supimosi rezultatai yra kintantys, todėl buvo išrinktos pikinės reikšmės iš rezultatų 3 priede, o tada surašytos į 11 lentelę. Pagal 5 skyriuje aprašytas formules buvo apskaičiuotos vertikalaus ir kilinio supimosi reikšmės: vertikalaus – 0,0235m., kilinio – 2,67 laipsn. Naudojantis šiais rezultatais apskaičiuotos KU mokslinių tyrimų laivo kilinio ir vertikalaus supimosi slopinimo dydžiai, kurie pateikti 12 lentelėje. Galutiniame variante supimosi slopinimo rezultatai gauti skirtingi skaičiuojant MS Excell sukurta programa ir „FLOW 3D“: linijine teorija skaičiavimo rezultatai gaunami neigiami, o skaičiuojamąja skysčių dinamikos programa „FLOW 3D“ teigiamas. Tai reiškia kad linijine teorija apskaičiuota, kad povandeninis sparnas ne slopins, o stiprins supimą, o su „Flow 3D“ apskaičiuota – kad slopins. Vis dėl to FLOW 3D programa sukurta – pritaikyta masės, momentų ir srautą veikiančių jėgų skaičiavimų, kurių atstojamosios yra proporcingai lygios kūną veikiančioms jėgoms. Programa sumodeliuota kuo tiksliau atgaminti nurodytas sąlygas ir imituoti tiriamo kūno elgseną, todėl laikome, kad šia programa gauti rezultatai yra tikslesni sudarytos užduoties skaičiavimams.

LITERATŪRA

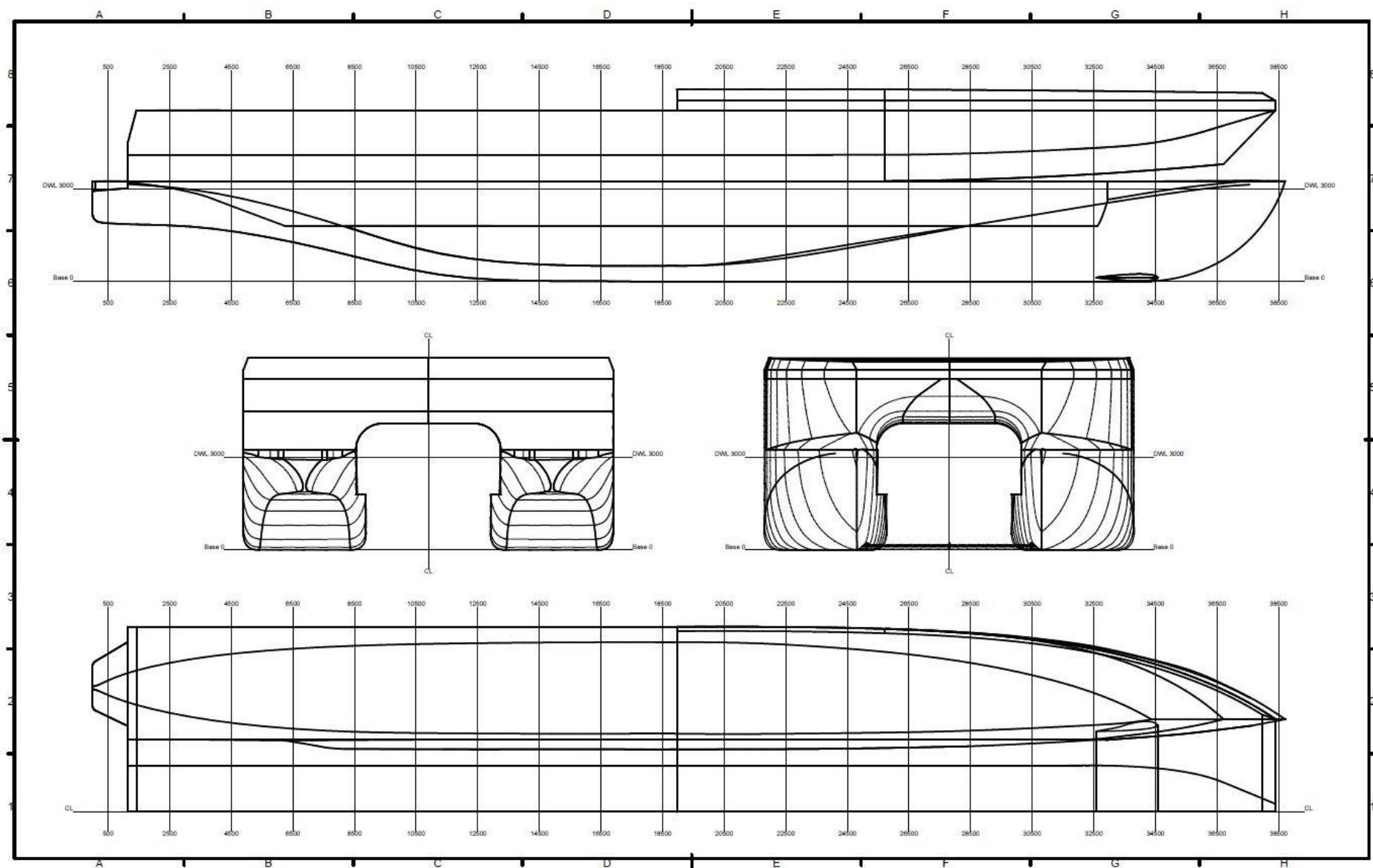
1. Baltijos slėnis oficialus puslapis [interaktyvus]. Informacijos centras [žiūrėta 2017 m. balandžio 29 d.]. Prieiga per internetą: http://balticvalley.lt/?page_id=1642.
2. Bertram V. 2002. Practical Ship Hydrodynamics. Oxford: Linacre House.
3. Davis M. R., Holloway D. S. 2003. The influence of hull form on the of high speed vessels in head seas // Ocean Engineering. Nr. 1, p. 2091–2115.
4. Djačkov V., Automatizuotų projektavimo sistemų taikymas laivų statyboje // Transporto priemonės – 2002. Tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga. ISBN 9955-09-289-0. Kaunas: Technologija, 2002, p. 55–60.
5. Djačkov V., 2005. Greitaeigių katamaranų išilginio supimosi stabilizavimo tyrimai. Kaipėda: Klaipėdos universitetas.
6. Duan W., Han Y., Wang R., Huang L. 2016. A predictive controller for joint pitch – roll stabilization. Harbin: Harbin Engineering university.
7. Journée, J.M.J., Adegeest, L. J. M. 2003. Theoretical manual of „Seaway for Windows“.
8. Lee C. M., Jones H. D., Curphey, R. M. 1979. Prediction of motion and hydrodynamic loads of catamarans. Washington: Naval Ship Research and Development Center.
9. Lubys D. 2016. KU mokslinių – tyrimų laivo kilinio ir vertikalaus supimosi tyrimai naudojant CFD programinę įrangą. Kaipėda: Klaipėdos universitetas.
10. Molland, Anthony F., and Turnock, Stephen R. 2011. Marine Rudders and Control Surfaces : Principles, Data, Design and Applications. Jordan Hill, GB: Butterworth-Heinemann.
11. Stern F., Yang J., Wang Z., and ect. 2012. Computational Ship Hydrodynamics: Nowadays and Way Forward. Gothenburg, Sweden, 26-31
12. Terao Y., Sakagami N. 2015. Design and development of an autonomous wave – powered boat with a wave devouring propulsion system. Advanced robotics. Vol. 29, p. 89 – 102.
13. Wu T., Guo J., Chen Y., Chen W. 1999. Control system design and performance evaluation of anti – pitching fins. Taiwan: National Taiwan university.
14. Zhu D. X. 1998. Katory M. A time-domain prediction method of ship motions // Ocean Engineering. Vol. 25, Nr. 9, p. 781–791.
15. Алферьев М. Я., Мадорский Г. С. Транспортные катамараны внутреннего плавания. Москва: Транспорт, 1976, 336 с.
16. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Ленинград: Судостроение, 1976, 176 с.
17. Дубровский В. А. Проблемы создания многокорпусных судов на международной конференции FAST’01 // Судостроение. Санкт-Петербург, 2002, Nr. 1, с. 17–19.

18. Луговский В. В. Качка корабля. Санкт-Петербург: СПб МТУ, 1999, 425 с.
19. Ремез Ю. В. Качка корабля. Ленинград: Судостроение, 1983, 328 с.
20. Семенов-Тян-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Качка корабля. Ленинград: Судостроение, 1969, 392 с.

PRIEDAI

- 1 PRIEDAS. KU mokslinių tyrimų laivo mintis teorinis brėžinys.
- 2 PRIEDAS: Katamarano su povandeniniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi charakteristikų skaičiavimų rezultatai, naudojant linijinę išilginio supimosi skaičiavimo metodiką.
- 3 PRIEDAS: KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatai, skaičiuoti FLOW 3D programa.

1 priedas. KU mokslinių tyrimų laivo – katamarano „Mintis“, su povandeniniu sparnu teorinis brėžinys



2 priedas: Katamarano su povandeniniu sparnu kilinio ir vertikalaus supimosi charakteristikų rezultatai, naudojant linijinę išilginio supimosi skaičiavimo metodiką.

$\lambda, \text{ M}$	200	150	100	60	50	40	30	20	12
σ_0	0.56	0.64	0.79	1.01	1.11	1.24	1.43	1.76	2.27
σ_k	0.68	0.81	1.04	1.45	1.63	1.89	2.30	3.05	4.42
ω_ζ	0.39	0.46	0.59	0.82	0.92	1.07	1.30	1.73	2.50
ω_ψ	0.49	0.59	0.75	1.04	1.17	1.36	1.66	2.20	3.19
$\zeta_0 \text{ M}$	3.97	2.94	1.77	0.64	0.35	0.19	0.12	0.00	0.00
ζ_0 / r	0.88	0.81	0.66	0.35	0.22	0.14	0.11	0.01	0.01
$\gamma_3, \text{ laipsn}$	8.16	9.42	11.28	11.41	2.48	325.10	295.34	94.41	238.58
$\psi_0, \text{ laipsn.}$	10.89	9.44	7.66	5.80	5.12	3.89	0.90	0.41	0.13
ψ_0 / α_0	1.34	1.08	0.79	0.53	0.44	0.32	0.07	0.03	0.01
ζ_1	75.49	88.66	106.37	130.86	144.27	173.02	222.84	68.92	247.66
ζ_2	3.93	2.90	1.74	0.63	0.35	0.15	0.05	0.00	0.00
ψ_1	-0.56	-0.48	-0.35	-0.13	-0.02	0.11	0.11	0.00	0.00
ψ_2	2.73	0.22	-2.16	-3.79	-4.16	-3.86	-0.66	0.15	-0.05
r_0	-10.54	-9.43	-7.35	-4.39	-2.99	-0.47	0.61	-0.39	0.12
α_{0w}	4.52	3.64	2.69	1.83	1.60	1.35	1.09	0.80	0.55
k_1	8.14	8.74	9.68	11.00	11.51	12.17	13.08	14.47	16.44
α_0^{kn}	-0.03	-0.04	-0.06	-0.10	-0.13	-0.16	-0.21	-0.31	-0.52
$\alpha_1^{kn0} = \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_2^{kn0} = I^{kn} \Psi_0 \sigma_k / v$	10.89	9.44	7.66	5.80	5.12	3.89	0.90	0.41	0.13
$\alpha_3^{kn0} = \zeta_0 \sigma_k / v$	32.72	33.71	35.11	36.80	36.59	32.25	9.05	5.55	2.58
$\alpha_4^{kn0} = r_0 \sigma_k e^{-k1hn} /$	37.79	33.21	25.70	12.92	7.89	4.88	3.80	0.17	0.28
$\alpha_5^{kn0} = K_1^{kn} \Psi_0$	-39.66	-36.97	-33.14	-28.05	-26.10	-23.60	-20.19	-15.07	-8.64
$\alpha_6^{kn0} = K_2^{kn} \sigma_k \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_7^{kn0} = K_3^{kn} \sigma_k^2 \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\Sigma \alpha^{kn}, \text{ laipsn.}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
α_0^{kk}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_1^{kk0} = \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_2^{kk0} = I^{kk} \Psi_0 \sigma_k / v$	10.89	9.44	7.66	5.80	5.12	3.89	0.90	0.41	0.13
$\alpha_3^{kk0} = \zeta_0 \sigma_k / v$	-14.31	-14.74	-15.35	-16.09	-16.00	-14.10	-3.96	-2.43	-1.13
$\alpha_4^{kk0} = r_0 \sigma_k e^{-k1hk}$	37.79	33.21	25.70	12.92	7.89	4.88	3.80	0.17	0.28
$\alpha_5^{kk0} = K_1^{kk} \Psi_0$	-40.42	-37.91	-34.42	-29.87	-28.15	-25.94	-22.89	-18.19	-11.83
$\alpha_6^{kk0} = K_2^{kk} \sigma_k \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\alpha_7^{kk0} = K_3^{kk} \sigma_k^2 \Psi_0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\Sigma \alpha^{kk}, \text{ laipsn.}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3 priedas: KU mokslinių tyrimų laivo su povandeniniu sparnu ir be povandeninio sparno vertikalaus ir kilinio supimosi rezultatai, skaičiuoti FLOW 3D programa:

Laikas,s	Vertikalus supimasis, m		Kilinis Supimasis, laipsn.	
	Be sparno	Su sparnu	Be Sparno	Su sparnu
0,10	4,99	4,99	-1,33	-1,29
0,20	4,99	4,99	-1,37	-1,33
0,30	4,98	4,98	-1,39	-1,36
0,40	4,97	4,97	-1,39	-1,36
0,50	4,96	4,96	-1,35	-1,34
0,60	4,95	4,95	-1,30	-1,29
0,70	4,94	4,94	-1,21	-1,21
0,80	4,93	4,93	-1,11	-1,10
0,90	4,92	4,92	-0,99	-0,98
1,00	4,91	4,91	-0,84	-0,83
1,10	4,90	4,90	-0,68	-0,67
1,20	4,89	4,89	-0,50	-0,50
1,30	4,89	4,89	-0,30	-0,32
1,40	4,88	4,88	-0,03	-0,07
1,50	4,88	4,88	0,25	0,20
1,60	4,88	4,88	0,51	0,45
1,70	4,88	4,88	0,70	0,63
1,80	4,88	4,88	0,85	0,79
1,90	4,88	4,88	0,99	0,92
2,00	4,88	4,88	1,10	1,03
2,10	4,88	4,89	1,17	1,12
2,20	4,89	4,89	1,22	1,18
2,30	4,89	4,89	1,25	1,21
2,40	4,89	4,90	1,25	1,21
2,50	4,90	4,90	1,22	1,20
2,60	4,90	4,90	1,18	1,17
2,70	4,90	4,91	1,11	1,12
2,80	4,90	4,91	1,02	1,05
2,90	4,91	4,91	0,92	0,96
3,00	4,91	4,91	0,82	0,88
3,10	4,91	4,92	0,70	0,78
3,20	4,91	4,92	0,60	0,68
3,30	4,91	4,92	0,48	0,58
3,40	4,91	4,92	0,38	0,50
3,50	4,92	4,92	0,28	0,41
3,60	4,92	4,92	0,18	0,32
3,70	4,92	4,92	0,10	0,26
3,80	4,92	4,92	0,03	0,19
3,90	4,92	4,91	-0,03	0,14
4,00	4,92	4,91	-0,08	0,10
4,10	4,93	4,91	-0,10	0,07

4,20	4,93	4,92	-0,12	0,05
4,30	4,94	4,92	-0,12	0,05
4,40	4,94	4,92	-0,10	0,07
4,50	4,95	4,92	-0,07	0,09
4,60	4,95	4,93	-0,02	0,12
4,70	4,96	4,93	0,04	0,17
4,80	4,97	4,94	0,11	0,22
4,90	4,98	4,95	0,19	0,28
5,00	4,99	4,96	0,28	0,35
5,10	5,00	4,97	0,37	0,42
5,20	5,01	4,98	0,46	0,49
5,30	5,03	4,99	0,55	0,56
5,40	5,04	5,00	0,64	0,63
5,50	5,05	5,02	0,72	0,69
5,60	5,07	5,04	0,80	0,75
5,70	5,08	5,05	0,87	0,80
5,80	5,10	5,07	0,93	0,84
5,90	5,11	5,09	0,97	0,88
6,00	5,13	5,10	1,00	0,89
6,10	5,14	5,12	1,02	0,90
6,20	5,16	5,14	1,02	0,89
6,30	5,17	5,15	1,01	0,88
6,40	5,18	5,17	0,99	0,85
6,50	5,20	5,19	0,95	0,81
6,60	5,21	5,20	0,89	0,70
6,70	5,22	5,22	0,77	0,53
6,80	5,23	5,23	0,59	0,35
6,90	5,24	5,24	0,39	0,15
7,00	5,25	5,25	0,17	-0,06
7,10	5,26	5,26	-0,04	-0,25
7,20	5,26	5,26	-0,26	-0,45
7,30	5,27	5,27	-0,46	-0,60
7,40	5,27	5,27	-0,62	-0,73
7,50	5,28	5,28	-0,76	-0,82
7,60	5,28	5,28	-0,87	-0,87
7,70	5,29	5,28	-0,92	-0,87
7,80	5,29	5,29	-0,92	-0,83
7,90	5,30	5,29	-0,87	-0,75
8,00	5,31	5,30	-0,79	-0,62
8,10	5,32	5,31	-0,67	-0,48
8,20	5,34	5,33	-0,53	-0,33
8,30	5,35	5,34	-0,39	-0,19
8,40	5,37	5,36	-0,26	-0,09
8,50	5,39	5,38	-0,16	-0,01
8,60	5,42	5,40	-0,09	0,01
8,70	5,44	5,43	-0,08	-0,02

8,80	5,47	5,45	-0,12	-0,08
8,90	5,50	5,48	-0,21	-0,19
9,00	5,52	5,50	-0,34	-0,32
9,10	5,55	5,53	-0,50	-0,48
9,20	5,58	5,55	-0,67	-0,67
9,30	5,60	5,57	-0,85	-0,85
9,40	5,62	5,59	-1,01	-1,00
9,50	5,64	5,61	-1,13	-1,10
9,60	5,66	5,63	-1,21	-1,18
9,70	5,67	5,64	-1,23	-1,22
9,80	5,68	5,65	-1,20	-1,19
9,90	5,69	5,66	-1,09	-1,08
10,00	5,69	5,67	-0,78	-0,89
10,10	5,69	5,68	-0,31	-0,56
10,20	5,70	5,68	0,17	-0,11
10,30	5,70	5,69	0,66	0,27
10,40	5,70	5,70	0,78	0,41
10,50	5,70	5,70	0,83	0,45
10,60	5,69	5,70	0,81	0,43
10,70	5,68	5,69	0,74	0,36
10,80	5,66	5,68	0,62	0,26
10,90	5,65	5,67	0,46	0,15
11,00	5,63	5,66	0,26	0,03
11,10	5,62	5,65	0,06	-0,06
11,20	5,61	5,64	-0,14	-0,14
11,30	5,60	5,64	-0,32	-0,15
11,40	5,60	5,64	-0,44	-0,14
11,50	5,60	5,64	-0,51	-0,11
11,60	5,60	5,64	-0,52	-0,10
11,70	5,61	5,65	-0,49	-0,16
11,80	5,63	5,67	-0,47	-0,28
11,90	5,65	5,68	-0,47	-0,46
12,00	5,67	5,69	-0,56	-0,69
12,10	5,70	5,71	-0,80	-1,00
12,20	5,72	5,72	-1,06	-1,03
12,30	5,74	5,72	-1,29	-0,96
12,40	5,75	5,73	-1,34	-0,89
12,50	5,75	5,73	-1,35	-0,83
12,60	5,76	5,73	-1,35	-0,77
12,70	5,76	5,73	-1,34	-0,74
12,80	5,76	5,72	-1,32	-0,70
12,90	5,75	5,72	-1,28	-0,67
13,00	5,75	5,71	-1,22	-0,63
13,10	5,74	5,71	-1,14	-0,60
13,20	5,73	5,70	-1,03	-0,55
13,30	5,73	5,69	-0,91	-0,50

13,40	5,72	5,68	-0,76	-0,43
13,50	5,71	5,67	-0,60	-0,36
13,60	5,70	5,66	-0,43	-0,28
13,70	5,69	5,65	-0,26	-0,19
13,80	5,68	5,64	-0,08	-0,11
13,90	5,67	5,64	0,11	-0,03
14,00	5,66	5,63	0,29	0,06
14,10	5,65	5,62	0,46	0,13
14,20	5,64	5,62	0,64	0,20
14,40	5,64	5,61	0,77	0,32
14,50	5,63	5,61	0,91	0,38
14,60	5,62	5,61	1,01	0,42
14,70	5,61	5,61	1,09	0,45
14,80	5,61	5,61	1,13	0,46
14,90	5,60	5,61	1,15	0,44
15,00	5,59	5,61	1,12	0,39
15,10	5,59	5,61	1,05	0,34
15,20	5,58	5,60	0,94	0,27
15,30	5,57	5,60	0,80	0,16
15,40	5,57	5,59	0,62	0,05
15,50	5,56	5,59	0,42	-0,08
15,60	5,55	5,58	0,20	-0,21
15,70	5,54	5,57	-0,03	-0,34
15,80	5,53	5,56	-0,24	-0,46
15,90	5,52	5,55	-0,46	-0,55
16,00	5,51	5,53	-0,64	-0,60
16,10	5,50	5,52	-0,78	-0,62
16,20	5,49	5,51	-0,86	-0,58
16,30	5,48	5,49	-0,90	-0,51
16,40	5,47	5,48	-0,87	-0,39
16,50	5,46	5,47	-0,78	-0,22
16,60	5,46	5,45	-0,64	-0,03
16,70	5,45	5,44	-0,45	0,19
16,80	5,45	5,43	-0,21	0,44
16,90	5,44	5,42	0,05	0,68
17,00	5,44	5,41	0,34	0,91
17,10	5,43	5,40	0,64	1,15
17,20	5,43	5,39	0,93	1,36
17,30	5,43	5,38	1,20	1,54
17,40	5,42	5,38	1,45	1,67
17,50	5,42	5,37	1,64	1,73
17,60	5,41	5,37	1,78	1,78
17,70	5,41	5,37	1,88	1,78
17,80	5,41	5,37	1,90	1,72
17,90	5,40	5,37	1,88	1,62
18,00	5,40	5,37	1,79	1,48

18,10	5,39	5,37	1,65	1,31
18,20	5,39	5,37	1,47	1,12
18,30	5,39	5,38	1,25	0,89
18,40	5,39	5,38	0,99	0,61
18,50	5,39	5,39	0,68	0,29
18,60	5,38	5,39	0,34	0,05
18,70	5,38	5,39	-0,01	-0,37
18,80	5,38	5,40	-0,36	-0,68
18,90	5,39	5,40	-0,67	-0,92
19,00	5,39	5,41	-0,92	-1,05
19,10	5,39	5,41	-1,10	-1,11
19,20	5,40	5,42	-1,23	-1,14
19,30	5,41	5,42	-1,30	-1,12
19,40	5,42	5,43	-1,30	-1,06
19,50	5,43	5,44	-1,24	-0,95
19,60	5,44	5,45	-1,11	-0,76
19,70	5,45	5,46	-0,93	-0,55
19,80	5,47	5,47	-0,69	-0,32
19,90	5,48	5,48	-0,41	-0,07
20,00	5,49	5,48	-0,11	0,18
20,10	5,51	5,49	0,21	0,41
20,20	5,52	5,50	0,51	0,62
20,30	5,53	5,51	0,81	0,80
20,40	5,54	5,52	1,05	0,95
20,50	5,55	5,53	1,23	1,06
20,60	5,56	5,54	1,36	1,11
20,70	5,56	5,54	1,38	1,02
20,80	5,57	5,55	1,21	0,81
20,90	5,57	5,56	0,92	0,49
21,00	5,57	5,56	0,55	0,15
21,10	5,57	5,56	0,13	-0,27
21,20	5,56	5,56	-0,29	-0,66
21,30	5,55	5,56	-0,72	-0,98
21,40	5,55	5,56	-1,11	-1,25
21,50	5,54	5,55	-1,40	-1,38
21,60	5,53	5,55	-1,52	-1,38
21,70	5,53	5,55	-1,58	-1,35
21,80	5,53	5,55	-1,60	-1,29
21,90	5,53	5,56	-1,57	-1,19
22,00	5,53	5,56	-1,50	-1,06
22,10	5,54	5,57	-1,38	-0,89
22,20	5,55	5,57	-1,21	-0,70
22,30	5,55	5,58	-1,02	-0,51
22,40	5,57	5,58	-0,79	-0,31
22,50	5,58	5,59	-0,53	-0,10
22,60	5,59	5,60	-0,24	0,12

22,70	5,60	5,61	0,08	0,35
22,80	5,62	5,62	0,38	0,56
22,90	5,63	5,62	0,66	0,73
23,00	5,64	5,63	0,94	0,88
23,10	5,65	5,64	1,19	1,00
23,20	5,66	5,65	1,38	1,09
23,30	5,67	5,66	1,52	1,14
23,40	5,68	5,66	1,63	1,10
23,50	5,68	5,67	1,63	0,81
23,60	5,68	5,67	1,31	0,43
23,70	5,68	5,67	0,86	0,00
23,80	5,68	5,67	0,40	-0,43
23,90	5,67	5,66	-0,10	-0,79
24,00	5,65	5,65	-0,59	-1,04
24,10	5,64	5,64	-1,00	-1,07
24,20	5,62	5,64	-1,21	-1,08
24,30	5,61	5,63	-1,29	-1,07
24,40	5,60	5,63	-1,35	-1,06
24,50	5,59	5,63	-1,39	-1,04
24,60	5,59	5,63	-1,41	-1,01
24,70	5,59	5,63	-1,40	-0,95
24,80	5,59	5,63	-1,37	-0,87
24,90	5,60	5,64	-1,31	-0,75
25,00	5,61	5,65	-1,21	-0,62
25,10	5,62	5,65	-1,06	-0,49
25,20	5,63	5,66	-0,88	-0,34
25,30	5,64	5,67	-0,68	-0,17
25,40	5,66	5,68	-0,48	-0,02
25,50	5,68	5,69	-0,26	0,16
25,60	5,69	5,70	-0,04	0,35
25,70	5,71	5,70	0,20	0,54
25,80	5,73	5,71	0,45	0,73
25,90	5,74	5,71	0,68	0,92
26,00	5,75	5,72	0,90	1,08
26,10	5,77	5,72	1,11	1,26
26,20	5,77	5,72	1,29	1,40
26,30	5,78	5,72	1,45	1,54
26,40	5,78	5,71	1,56	1,61
26,50	5,78	5,70	1,61	1,31
26,60	5,77	5,69	1,56	0,93
26,70	5,75	5,67	1,31	0,55
26,80	5,73	5,66	1,01	0,20
26,90	5,70	5,64	0,70	-0,10
27,00	5,66	5,62	0,44	-0,31
27,10	5,63	5,61	0,33	-0,41
27,20	5,60	5,60	0,29	-0,41

27,30	5,58	5,60	0,23	-0,41
27,40	5,57	5,60	0,16	-0,39
27,50	5,56	5,61	0,08	-0,34
27,60	5,55	5,62	0,01	-0,28
27,70	5,55	5,64	-0,08	-0,21
27,80	5,56	5,66	-0,14	-0,12
27,90	5,58	5,68	-0,19	-0,02
28,00	5,60	5,70	-0,23	-0,02
28,10	5,62	5,72	-0,24	-0,24
28,20	5,65	5,73	-0,28	-0,47
28,30	5,69	5,74	-0,48	-0,69
28,40	5,72	5,74	-0,76	-0,81
28,50	5,74	5,74	-0,98	-0,68
28,60	5,76	5,73	-1,17	-0,43
28,80	5,77	5,70	-1,31	0,21
28,90	5,78	5,69	-1,27	0,54
29,00	5,78	5,68	-1,07	0,88
29,10	5,78	5,68	-0,78	1,16
29,20	5,77	5,67	-0,43	1,42
29,30	5,77	5,67	-0,07	1,50
29,40	5,76	5,67	0,35	1,21
29,50	5,75	5,67	0,76	1,10
29,60	5,74	5,66	1,16	0,82
29,70	5,72	5,66	1,55	0,49
29,80	5,71	5,65	1,90	0,16
29,90	5,69	5,65	2,19	-0,15
30,00	5,68	5,64	1,97	-0,46
30,10	5,66	5,64	1,63	-0,74
30,20	5,64	5,64	1,27	-0,97
30,30	5,63	5,63	0,90	-1,11
30,40	5,61	5,64	0,51	-1,09
30,50	5,60	5,64	0,10	-0,86
30,60	5,59	5,65	-0,30	-0,61
30,70	5,58	5,66	-0,66	-0,33
30,80	5,58	5,68	-0,94	-0,07
30,90	5,58	5,69	-1,15	0,17
31,00	5,58	5,71	-1,21	0,20
31,10	5,60	5,73	-1,11	0,11
31,20	5,61	5,73	-0,96	0,00
31,30	5,64	5,73	-0,76	-0,12
31,40	5,66	5,72	-0,53	-0,20
31,50	5,69	5,70	-0,26	-0,25
31,60	5,72	5,69	-0,18	0,00
31,70	5,75	5,67	-0,20	0,29
31,80	5,76	5,66	-0,24	0,55
31,90	5,77	5,65	-0,27	0,82

32,00	5,77	5,64	-0,28	1,06
32,10	5,76	5,63	-0,26	1,16
32,20	5,75	5,63	-0,18	1,09
32,30	5,72	5,63	0,15	0,93
32,40	5,70	5,63	0,58	0,69
32,50	5,67	5,62	0,94	0,42
32,60	5,65	5,62	1,23	0,14
32,70	5,63	5,62	1,49	-0,16
32,80	5,61	5,62	1,64	-0,43
32,90	5,59	5,62	1,49	-0,68
33,00	5,58	5,62	1,28	-0,90
33,10	5,57	5,62	1,01	-1,04
33,20	5,56	5,62	0,67	-1,09
33,30	5,56	5,63	0,30	-0,99
33,40	5,55	5,63	-0,11	-0,79
33,50	5,55	5,64	-0,48	-0,58
33,60	5,55	5,66	-0,85	-0,38
33,70	5,56	5,67	-1,17	-0,21
33,80	5,57	5,68	-1,43	-0,04
33,90	5,58	5,70	-1,55	0,11
34,00	5,59	5,71	-1,52	0,11
34,10	5,61	5,71	-1,45	-0,07
34,20	5,63	5,71	-1,34	-0,26
34,30	5,65	5,70	-1,20	-0,21
34,40	5,68	5,69	-1,02	-0,09
34,50	5,70	5,67	-0,78	0,01
34,60	5,72	5,66	-0,52	0,11
34,70	5,74	5,65	-0,27	0,21
34,80	5,75	5,63	-0,03	0,31
34,90	5,76	5,62	0,20	0,40
35,00	5,75	5,61	0,40	0,49
35,10	5,75	5,60	0,62	0,56
35,20	5,73	5,59	0,83	0,63
35,30	5,72	5,59	1,04	0,65
35,40	5,69	5,58	1,25	0,66
35,50	5,67	5,58	1,37	0,64
35,60	5,64	5,58	1,44	0,55
35,70	5,62	5,58	1,42	0,38
35,80	5,59	5,59	1,26	0,14
35,90	5,57	5,59	1,01	-0,12
36,00	5,55	5,60	0,71	-0,38
36,10	5,53	5,60	0,42	-0,62
36,20	5,51	5,61	0,13	-0,78
36,30	5,50	5,61	-0,12	-0,86
36,40	5,49	5,62	-0,34	-0,84
36,50	5,48	5,63	-0,50	-0,80

36,60	5,48	5,63	-0,65	-0,75
36,70	5,48	5,64	-0,78	-0,70
36,80	5,49	5,65	-0,91	-0,65
36,90	5,51	5,66	-1,01	-0,60
37,00	5,52	5,66	-1,10	-0,54
37,10	5,54	5,67	-1,16	-0,48
37,20	5,56	5,67	-1,19	-0,41
37,30	5,59	5,67	-1,19	-0,35
37,40	5,61	5,67	-1,16	-0,24
37,50	5,63	5,66	-1,11	-0,14
37,60	5,66	5,66	-1,02	-0,03
37,70	5,68	5,65	-0,87	0,08
37,80	5,70	5,64	-0,69	0,20
37,90	5,71	5,63	-0,49	0,30
38,00	5,72	5,62	-0,26	0,41
38,10	5,73	5,61	-0,03	0,50
38,20	5,73	5,60	0,21	0,58
38,30	5,72	5,59	0,44	0,65
38,40	5,71	5,58	0,68	0,72
38,50	5,69	5,57	0,91	0,77
38,60	5,68	5,57	1,10	0,80
38,70	5,65	5,56	1,25	0,81
38,80	5,63	5,56	1,35	0,79
38,90	5,61	5,56	1,40	0,75
39,00	5,59	5,56	1,42	0,69
39,10	5,57	5,56	1,39	0,62
39,20	5,55	5,57	1,31	0,49
39,30	5,53	5,58	1,19	0,27
39,40	5,52	5,58	1,03	-0,01
39,50	5,51	5,59	0,80	-0,29
39,60	5,50	5,60	0,50	-0,59
39,70	5,50	5,60	0,18	-0,82
39,80	5,49	5,61	-0,16	-0,97
39,90	5,50	5,62	-0,49	-1,00
40,00	5,50	5,62	-0,79	-0,97
40,10	5,51	5,63	-1,01	-0,93
40,20	5,53	5,64	-1,17	-0,85
40,29	5,54	5,65	-1,28	-0,78
40,40	5,56	5,66	-1,35	-0,68
40,50	5,59	5,66	-1,37	-0,55
40,60	5,61	5,67	-1,33	-0,41
40,70	5,63	5,67	-1,24	-0,22
40,80	5,66	5,68	-1,11	0,00
40,90	5,68	5,68	-0,91	0,20
41,00	5,71	5,67	-0,65	0,41
41,10	5,72	5,67	-0,38	0,61

41,20	5,74	5,67	-0,10	0,75
41,30	5,74	5,66	0,16	0,88
41,40	5,75	5,65	0,43	0,97
41,50	5,74	5,64	0,66	1,04
41,60	5,73	5,64	0,88	1,09
41,70	5,71	5,63	1,10	1,06
41,80	5,69	5,62	1,28	0,88
41,90	5,67	5,62	1,39	0,60
42,00	5,64	5,61	1,43	0,30
42,10	5,62	5,60	1,42	0,00
42,20	5,60	5,59	1,29	-0,27
42,30	5,57	5,58	1,04	-0,48
42,40	5,55	5,58	0,75	-0,59
42,50	5,53	5,57	0,43	-0,62
42,60	5,52	5,57	0,10	-0,64
42,70	5,51	5,57	-0,18	-0,64
42,80	5,50	5,57	-0,42	-0,64
42,90	5,49	5,58	-0,60	-0,63
43,00	5,49	5,58	-0,78	-0,59
43,10	5,49	5,59	-0,94	-0,55
43,20	5,50	5,60	-1,08	-0,51
43,30	5,51	5,60	-1,20	-0,45
43,40	5,53	5,61	-1,27	-0,39
43,50	5,55	5,62	-1,30	-0,33
43,60	5,57	5,62	-1,27	-0,25
43,70	5,59	5,63	-1,19	-0,16
43,80	5,61	5,63	-1,08	-0,05
43,90	5,63	5,63	-0,91	0,06
44,00	5,65	5,63	-0,72	0,18
44,10	5,66	5,63	-0,47	0,28
44,19	5,68	5,62	-0,18	0,38
44,30	5,69	5,62	0,10	0,47
44,40	5,69	5,61	0,38	0,54
44,50	5,69	5,60	0,64	0,60
44,60	5,69	5,59	0,89	0,65
44,70	5,68	5,58	1,10	0,67
44,80	5,66	5,58	1,25	0,67
44,90	5,65	5,57	1,35	0,63
45,00	5,63	5,56	1,39	0,57
45,10	5,61	5,55	1,38	0,48
45,20	5,59	5,54	1,32	0,37
45,30	5,57	5,53	1,20	0,26
45,40	5,54	5,52	1,04	0,12
45,50	5,52	5,51	0,82	-0,01
45,60	5,50	5,51	0,55	-0,16

45,70	5,48	5,50	0,27	-0,32
45,80	5,46	5,49	0,00	-0,47
45,90	5,44	5,49	-0,29	-0,61
46,00	5,43	5,48	-0,57	-0,73
46,10	5,42	5,47	-0,84	-0,84
46,20	5,40	5,47	-1,10	-0,91
46,30	5,40	5,46	-1,31	-0,95
46,40	5,39	5,45	-1,49	-0,95
46,50	5,39	5,45	-1,60	-0,91
46,60	5,39	5,44	-1,65	-0,83
46,70	5,39	5,44	-1,63	-0,71
46,80	5,39	5,43	-1,53	-0,56
46,90	5,40	5,43	-1,36	-0,37
47,00	5,41	5,43	-1,13	-0,16
47,10	5,42	5,42	-0,84	0,07
47,20	5,43	5,42	-0,52	0,29
47,30	5,44	5,42	-0,18	0,48
47,40	5,45	5,42	0,18	0,66
47,50	5,46	5,41	0,51	0,81
47,60	5,47	5,41	0,83	0,92
47,70	5,47	5,41	1,11	1,01
47,80	5,48	5,41	1,35	1,05
47,90	5,48	5,41	1,55	1,07
48,00	5,48	5,42	1,68	1,05
48,10	5,48	5,42	1,74	1,02
48,20	5,48	5,42	1,75	0,94
48,30	5,48	5,42	1,67	0,82
48,40	5,47	5,42	1,54	0,67
48,50	5,47	5,43	1,36	0,51
48,60	5,46	5,43	1,14	0,34
48,70	5,45	5,43	0,87	0,15
48,80	5,44	5,43	0,57	-0,04
48,90	5,43	5,43	0,23	-0,21
49,00	5,42	5,43	-0,10	-0,39
49,10	5,41	5,43	-0,42	-0,56
49,20	5,40	5,43	-0,68	-0,70
49,30	5,39	5,43	-0,93	-0,80
49,40	5,39	5,43	-1,13	-0,87
49,50	5,38	5,43	-1,28	-0,88
49,60	5,38	5,44	-1,37	-0,84
49,70	5,38	5,44	-1,40	-0,76
49,80	5,38	5,44	-1,36	-0,64
49,90	5,38	5,44	-1,25	-0,49
50,00	5,39	5,44	-1,08	-0,31
50,10	5,39	5,45	-0,85	-0,10
50,20	5,40	5,45	-0,59	0,11

50,30	5,42	5,46	-0,27	0,30
50,40	5,43	5,46	0,04	0,50
50,50	5,44	5,47	0,36	0,68
50,60	5,46	5,47	0,69	0,82
50,70	5,47	5,48	0,98	0,95
50,80	5,49	5,49	1,22	1,04
50,90	5,50	5,49	1,42	1,09
51,00	5,51	5,50	1,56	1,11
51,10	5,53	5,51	1,64	1,11
51,20	5,54	5,52	1,65	0,98
51,30	5,55	5,53	1,53	0,74
51,40	5,56	5,53	1,23	0,41
51,50	5,56	5,54	0,81	0,05
51,60	5,57	5,54	0,33	-0,35
51,70	5,57	5,54	-0,17	-0,71
51,80	5,56	5,54	-0,66	-1,03
51,90	5,56	5,54	-1,10	-1,24
52,00	5,55	5,54	-1,50	-1,29
52,10	5,54	5,54	-1,71	-1,25
52,20	5,53	5,54	-1,75	-1,18
52,30	5,53	5,54	-1,73	-1,06
52,40	5,52	5,54	-1,64	-0,90
52,50	5,52	5,55	-1,49	-0,71
52,60	5,52	5,55	-1,27	-0,46
52,70	5,52	5,55	-0,99	-0,21
52,80	5,52	5,56	-0,68	0,07
52,90	5,53	5,56	-0,32	0,32
53,00	5,54	5,57	0,06	0,58
53,10	5,54	5,57	0,43	0,82
53,20	5,55	5,58	0,79	1,03
53,30	5,56	5,58	1,14	1,20
53,40	5,56	5,59	1,44	1,31
53,50	5,57	5,59	1,69	1,30
53,60	5,58	5,60	1,88	1,10
53,70	5,59	5,60	2,01	0,79
53,80	5,60	5,61	1,94	0,44
53,90	5,61	5,61	1,63	0,04
54,00	5,61	5,61	1,23	-0,33
54,10	5,61	5,60	0,75	-0,67
54,20	5,61	5,60	0,27	-0,99
54,30	5,61	5,59	-0,17	-1,19
54,40	5,61	5,59	-0,65	-1,26
54,50	5,60	5,59	-1,14	-1,19
54,60	5,59	5,59	-1,58	-1,08
54,70	5,59	5,59	-1,91	-0,93
54,80	5,58	5,59	-2,03	-0,78

54,90	5,57	5,59	-1,98	-0,63
55,00	5,57	5,60	-1,88	-0,46
55,10	5,57	5,60	-1,74	-0,30
55,20	5,58	5,61	-1,56	-0,16
55,30	5,58	5,62	-1,33	0,00
55,40	5,59	5,62	-1,10	0,14
55,50	5,60	5,63	-0,81	0,29
55,60	5,60	5,63	-0,49	0,43
55,70	5,61	5,64	-0,16	0,56
55,80	5,62	5,64	0,18	0,68
55,90	5,63	5,64	0,53	0,77
56,00	5,63	5,64	0,85	0,86
56,10	5,64	5,64	1,15	0,92
56,20	5,64	5,64	1,41	0,88
56,30	5,64	5,64	1,62	0,71
56,40	5,64	5,63	1,78	0,47
56,50	5,64	5,62	1,90	0,20
56,60	5,64	5,62	1,95	-0,07
56,70	5,63	5,61	1,81	-0,28
56,80	5,63	5,60	1,47	-0,42
56,90	5,62	5,59	1,03	-0,45
57,00	5,61	5,58	0,55	-0,44
57,10	5,59	5,57	0,05	-0,41
57,20	5,57	5,57	-0,41	-0,39
57,30	5,56	5,56	-0,82	-0,35
57,40	5,54	5,56	-1,12	-0,33
57,61	5,53	5,56	-1,25	-0,27
57,70	5,52	5,56	-1,33	-0,24
57,80	5,51	5,56	-1,38	-0,23
57,90	5,50	5,57	-1,39	-0,23
58,00	5,50	5,57	-1,37	-0,23
58,10	5,50	5,57	-1,31	-0,21
58,20	5,51	5,57	-1,23	-0,20
58,30	5,51	5,57	-1,11	-0,19
58,40	5,52	5,57	-0,96	-0,16
58,50	5,53	5,57	-0,80	-0,12
58,60	5,53	5,57	-0,62	-0,07
58,70	5,54	5,56	-0,41	-0,01
58,80	5,55	5,56	-0,19	0,05
58,90	5,56	5,55	0,05	0,14
59,00	5,57	5,55	0,30	0,22
59,10	5,58	5,54	0,56	0,30
59,20	5,58	5,53	0,78	0,37
59,30	5,58	5,53	1,00	0,43
59,40	5,59	5,52	1,19	0,47
59,50	5,58	5,51	1,35	0,50

59,59	5,58	5,51	1,47	0,51
59,70	5,57	5,50	1,55	0,51
59,80	5,57	5,50	1,59	0,49
59,90	5,56	5,50	1,56	0,45
60,00	5,55	5,49	1,48	0,42
60,10	5,54	5,49	1,33	0,36
60,20	5,53	5,49	1,07	0,29
60,30	5,51	5,49	0,74	0,20
60,39	5,50	5,49	0,37	0,11
60,50	5,49	5,50	0,01	-0,01
60,60	5,47	5,50	-0,33	-0,13
60,70	5,46	5,50	-0,60	-0,24
60,80	5,45	5,50	-0,81	-0,35
60,90	5,44	5,51	-1,00	-0,46
61,00	5,43	5,51	-1,17	-0,56
61,10	5,43	5,51	-1,30	-0,64
61,20	5,43	5,51	-1,40	-0,69
61,30	5,43	5,51	-1,46	-0,72
61,40	5,43	5,51	-1,47	-0,72
61,50	5,44	5,51	-1,43	-0,68
61,60	5,44	5,51	-1,32	-0,62
61,70	5,45	5,50	-1,16	-0,49
61,80	5,46	5,50	-0,94	-0,36
61,90	5,47	5,50	-0,68	-0,20
62,00	5,48	5,49	-0,39	-0,02
62,10	5,49	5,49	-0,10	0,17
62,20	5,50	5,48	0,22	0,33
62,30	5,51	5,48	0,54	0,48
62,40	5,52	5,47	0,85	0,62
62,50	5,52	5,47	1,13	0,72
62,60	5,52	5,46	1,37	0,79
62,70	5,52	5,46	1,56	0,84
62,80	5,52	5,46	1,69	0,86
62,90	5,52	5,46	1,76	0,86
63,00	5,52	5,46	1,76	0,83
63,10	5,51	5,46	1,70	0,78
63,20	5,51	5,47	1,58	0,70
63,30	5,50	5,47	1,32	0,59
63,40	5,50	5,48	0,98	0,45
63,50	5,49	5,48	0,56	0,30
63,60	5,48	5,49	0,12	0,11
63,70	5,47	5,49	-0,33	-0,14
63,80	5,46	5,50	-0,75	-0,38
63,90	5,45	5,51	-1,07	-0,60
64,00	5,44	5,51	-1,29	-0,78
64,10	5,44	5,51	-1,47	-0,89

64,20	5,43	5,52	-1,61	-0,98
64,30	5,43	5,52	-1,70	-1,03
64,40	5,43	5,52	-1,74	-1,04
64,50	5,44	5,52	-1,72	-1,01
64,60	5,44	5,52	-1,63	-0,93
64,70	5,45	5,52	-1,47	-0,80
64,80	5,46	5,52	-1,24	-0,64
64,90	5,47	5,51	-0,96	-0,42
65,00	5,47	5,51	-0,64	-0,22
65,10	5,48	5,50	-0,28	0,00
65,20	5,49	5,50	0,09	0,20
65,30	5,50	5,49	0,45	0,41
65,40	5,51	5,49	0,78	0,57
65,50	5,51	5,48	1,09	0,71
65,60	5,52	5,48	1,37	0,80
65,70	5,52	5,47	1,60	0,87
65,80	5,52	5,47	1,75	0,89
65,90	5,52	5,47	1,84	0,89
66,00	5,52	5,47	1,86	0,86
66,10	5,52	5,47	1,80	0,79
66,20	5,52	5,47	1,67	0,71
66,30	5,52	5,47	1,43	0,58
66,40	5,51	5,48	1,04	0,44
66,50	5,51	5,48	0,60	0,28
66,60	5,50	5,49	0,09	0,10
66,70	5,49	5,49	-0,39	-0,09
66,80	5,48	5,50	-0,83	-0,30
66,90	5,47	5,50	-1,20	-0,49
67,00	5,46	5,51	-1,44	-0,68
67,10	5,46	5,51	-1,63	-0,83
67,20	5,45	5,51	-1,79	-0,97
67,30	5,45	5,51	-1,90	-1,07
67,40	5,44	5,51	-1,95	-1,13
67,50	5,44	5,51	-1,93	-1,15
67,60	5,44	5,51	-1,83	-1,10
67,70	5,45	5,51	-1,67	-1,03
67,80	5,45	5,51	-1,44	-0,87
67,90	5,46	5,51	-1,16	-0,69
68,00	5,46	5,50	-0,84	-0,51
68,10	5,47	5,50	-0,47	-0,30
68,20	5,47	5,49	-0,11	-0,09
68,30	5,48	5,48	0,27	0,12
68,40	5,48	5,48	0,62	0,32
68,50	5,49	5,47	0,96	0,50
68,60	5,49	5,47	1,27	0,67
68,70	5,50	5,47	1,53	0,80

68,80	5,50	5,46	1,74	0,89
68,90	5,50	5,46	1,89	0,93
69,00	5,50	5,46	1,97	0,95
69,10	5,50	5,46	1,98	0,92
69,20	5,50	5,46	1,92	0,87
69,30	5,50	5,46	1,79	0,80
69,40	5,50	5,47	1,61	0,68
69,50	5,49	5,47	1,34	0,55
69,60	5,49	5,47	0,94	0,38
69,70	5,49	5,48	0,48	0,21
69,80	5,48	5,48	-0,04	0,00
69,90	5,48	5,48	-0,51	-0,19
70,00	5,47	5,49	-0,95	-0,40
70,10	5,46	5,49	-1,29	-0,56
70,20	5,45	5,49	-1,56	-0,71
70,30	5,45	5,49	-1,77	-0,83
70,40	5,45	5,50	-1,94	-0,91
70,50	5,44	5,50	-2,04	-0,95
70,60	5,44	5,50	-2,05	-0,95
70,70	5,45	5,50	-1,98	-0,89
70,80	5,45	5,50	-1,82	-0,79
70,90	5,45	5,49	-1,59	-0,64
71,00	5,46	5,49	-1,30	-0,46
71,10	5,47	5,49	-0,94	-0,26
71,20	5,47	5,49	-0,56	-0,06
71,30	5,48	5,48	-0,16	0,15
71,40	5,48	5,48	0,24	0,36
71,50	5,49	5,48	0,65	0,54
71,60	5,49	5,48	1,01	0,70
71,70	5,50	5,48	1,35	0,82
71,80	5,50	5,47	1,65	0,91
71,90	5,50	5,48	1,88	0,97
72,00	5,51	5,48	2,06	0,98
72,10	5,51	5,48	2,16	0,97
72,20	5,51	5,48	2,18	0,93
72,30	5,51	5,49	2,12	0,85
72,40	5,51	5,49	1,98	0,74
72,50	5,51	5,49	1,76	0,60
72,60	5,51	5,50	1,37	0,43
72,70	5,50	5,50	0,87	0,22
72,80	5,50	5,51	0,30	-0,01
72,90	5,49	5,51	-0,25	-0,24
73,00	5,48	5,52	-0,82	-0,46
73,10	5,47	5,52	-1,27	-0,63
73,20	5,46	5,52	-1,61	-0,75
73,30	5,46	5,53	-1,82	-0,85

73,40	5,45	5,53	-1,98	-0,90
73,50	5,45	5,53	-2,06	-0,92
73,60	5,45	5,53	-2,07	-0,89
73,70	5,45	5,53	-1,98	-0,81
73,80	5,46	5,53	-1,80	-0,67
73,90	5,46	5,53	-1,54	-0,51
74,00	5,47	5,53	-1,22	-0,32
74,10	5,48	5,53	-0,85	-0,09
74,20	5,49	5,52	-0,45	0,12
74,30	5,50	5,52	-0,01	0,33
74,40	5,51	5,52	0,41	0,53
74,50	5,52	5,52	0,82	0,69
74,60	5,52	5,52	1,20	0,82
74,70	5,53	5,51	1,53	0,92
74,80	5,54	5,51	1,81	0,98
74,90	5,55	5,51	2,03	1,01
75,00	5,55	5,52	2,18	1,00
75,10	5,55	5,52	2,25	0,95
75,20	5,56	5,52	2,23	0,87
75,30	5,56	5,53	2,05	0,66
75,40	5,56	5,53	1,65	0,38
75,50	5,56	5,53	1,13	0,05
75,60	5,55	5,53	0,58	-0,31
75,70	5,54	5,53	-0,04	-0,64
75,80	5,53	5,53	-0,62	-0,89
75,90	5,52	5,53	-1,15	-1,02
76,00	5,50	5,53	-1,58	-1,09
76,10	5,49	5,53	-1,82	-1,12
76,20	5,48	5,52	-1,95	-1,12
76,30	5,47	5,52	-2,03	-1,07
76,40	5,46	5,52	-2,03	-0,98
76,50	5,46	5,52	-1,95	-0,84
76,60	5,45	5,52	-1,79	-0,66
76,70	5,46	5,52	-1,57	-0,43
76,80	5,46	5,52	-1,26	-0,20
76,90	5,47	5,52	-0,93	0,06
77,00	5,47	5,52	-0,54	0,31
77,10	5,48	5,52	-0,13	0,55
77,20	5,49	5,52	0,30	0,76
77,30	5,50	5,52	0,71	0,95
77,40	5,51	5,52	1,10	1,08
77,50	5,52	5,52	1,45	1,17
77,60	5,53	5,52	1,74	1,22
77,70	5,54	5,52	1,99	1,23
77,80	5,54	5,52	2,16	1,20
77,90	5,55	5,52	2,25	1,11

78,00	5,56	5,53	2,25	0,90
78,10	5,56	5,53	2,10	0,59
78,20	5,56	5,53	1,73	0,24
78,30	5,56	5,53	1,24	-0,16
78,40	5,56	5,53	0,69	-0,54
78,50	5,55	5,52	0,10	-0,88
78,60	5,54	5,52	-0,45	-1,13
78,70	5,53	5,52	-0,99	-1,23
78,80	5,51	5,52	-1,49	-1,28
78,90	5,50	5,51	-1,83	-1,30
79,00	5,48	5,51	-1,98	-1,29
79,10	5,47	5,51	-2,08	-1,24
79,20	5,46	5,51	-2,11	-1,14
79,30	5,46	5,51	-2,07	-1,01
79,40	5,45	5,51	-1,97	-0,82
79,50	5,45	5,51	-1,78	-0,60
79,60	5,46	5,51	-1,54	-0,37
79,70	5,46	5,51	-1,25	-0,11
79,80	5,47	5,51	-0,90	0,14
79,90	5,47	5,51	-0,52	0,39
80,00	5,48	5,51	-0,11	0,63
80,10	5,49	5,51	0,31	0,84
80,20	5,50	5,51	0,70	1,04
80,30	5,51	5,51	1,10	1,18
80,40	5,51	5,51	1,43	1,27
80,50	5,52	5,51	1,73	1,31
80,60	5,53	5,52	1,97	1,31
80,70	5,53	5,52	2,15	1,27
80,80	5,54	5,52	2,25	1,18
80,90	5,54	5,52	2,27	1,04
81,00	5,55	5,53	2,20	0,76
81,10	5,55	5,53	1,94	0,40
81,20	5,55	5,53	1,51	0,02
81,30	5,55	5,53	1,00	-0,37
81,40	5,54	5,53	0,42	-0,75
81,50	5,53	5,53	-0,16	-1,03
81,60	5,52	5,52	-0,72	-1,21
81,70	5,51	5,52	-1,24	-1,29
81,80	5,50	5,52	-1,65	-1,33
81,90	5,49	5,52	-1,89	-1,35
82,00	5,48	5,52	-2,03	-1,32
82,10	5,47	5,52	-2,12	-1,27
82,20	5,46	5,52	-2,14	-1,15
82,30	5,46	5,53	-2,09	-0,99
82,40	5,46	5,53	-1,97	-0,81
82,50	5,47	5,53	-1,78	-0,59

82,60	5,47	5,53	-1,53	-0,37
82,70	5,48	5,53	-1,24	-0,11
82,80	5,49	5,53	-0,88	0,13
82,90	5,50	5,53	-0,52	0,38
83,00	5,51	5,53	-0,12	0,61
83,10	5,52	5,53	0,30	0,81
83,20	5,53	5,53	0,70	1,00
83,30	5,54	5,53	1,11	1,15
83,40	5,55	5,53	1,45	1,28
83,50	5,56	5,53	1,74	1,34
83,60	5,56	5,53	1,99	1,36
83,70	5,57	5,53	2,17	1,32
83,80	5,57	5,53	2,28	1,25
83,90	5,57	5,54	2,32	1,14
84,00	5,57	5,54	2,27	0,90
84,10	5,57	5,54	2,01	0,57
84,20	5,57	5,54	1,57	0,18
84,30	5,56	5,54	1,03	-0,23
84,40	5,55	5,54	0,46	-0,63
84,50	5,54	5,54	-0,13	-0,96
84,60	5,53	5,54	-0,70	-1,16
84,70	5,52	5,54	-1,22	-1,26
84,80	5,50	5,53	-1,61	-1,31
84,90	5,49	5,53	-1,83	-1,34
85,00	5,48	5,53	-1,97	-1,33
85,10	5,47	5,53	-2,05	-1,28
85,20	5,47	5,54	-2,07	-1,16
85,30	5,47	5,54	-2,02	-1,00
85,40	5,47	5,54	-1,90	-0,81
85,50	5,48	5,54	-1,71	-0,60
85,60	5,48	5,54	-1,47	-0,37
85,70	5,49	5,54	-1,17	-0,11
85,80	5,50	5,54	-0,84	0,15
85,90	5,52	5,54	-0,47	0,39
86,00	5,53	5,54	-0,08	0,64
86,10	5,54	5,54	0,34	0,85
86,20	5,55	5,54	0,73	1,03
86,30	5,56	5,54	1,11	1,20
86,40	5,57	5,54	1,45	1,31
86,50	5,58	5,54	1,73	1,38
86,60	5,59	5,54	1,97	1,40
86,70	5,59	5,54	2,15	1,36
86,80	5,59	5,54	2,26	1,28
86,90	5,59	5,54	2,29	1,13
87,00	5,59	5,54	2,21	0,85
87,10	5,59	5,54	1,90	0,52

87,20	5,58	5,54	1,43	0,11
87,30	5,57	5,54	0,89	-0,30
87,40	5,56	5,53	0,30	-0,68
87,50	5,54	5,53	-0,27	-0,97
87,60	5,52	5,52	-0,78	-1,13
87,70	5,51	5,52	-1,24	-1,23
87,80	5,49	5,52	-1,54	-1,29
87,90	5,47	5,51	-1,71	-1,32
88,00	5,46	5,51	-1,84	-1,33
88,10	5,45	5,51	-1,93	-1,29
88,20	5,44	5,51	-1,95	-1,19
88,30	5,44	5,51	-1,92	-1,06
88,40	5,44	5,51	-1,81	-0,88
88,50	5,44	5,51	-1,65	-0,67
88,60	5,44	5,51	-1,43	-0,44
88,70	5,45	5,50	-1,16	-0,21
88,80	5,46	5,50	-0,84	0,03
88,90	5,47	5,50	-0,48	0,29
89,00	5,48	5,50	-0,11	0,54
89,10	5,49	5,50	0,28	0,75
89,20	5,51	5,50	0,65	0,95
89,30	5,52	5,50	1,01	1,13
89,40	5,53	5,50	1,32	1,26
89,50	5,53	5,50	1,62	1,33
89,60	5,54	5,50	1,85	1,36
89,70	5,55	5,50	2,02	1,33
89,80	5,55	5,50	2,13	1,27
89,90	5,55	5,50	2,16	1,17
90,00	5,55	5,50	2,11	1,06
90,10	5,55	5,50	1,98	0,89
90,20	5,54	5,50	1,67	0,61
90,30	5,54	5,50	1,22	0,28
90,40	5,53	5,50	0,70	-0,07
90,50	5,52	5,50	0,16	-0,41
90,60	5,50	5,49	-0,37	-0,72
90,70	5,49	5,49	-0,85	-0,95
90,80	5,47	5,49	-1,25	-1,15
90,90	5,46	5,49	-1,52	-1,28
91,00	5,44	5,48	-1,70	-1,36
91,10	5,43	5,48	-1,87	-1,40
91,20	5,42	5,48	-1,96	-1,41
91,30	5,42	5,48	-2,00	-1,36
91,40	5,41	5,48	-1,97	-1,26
91,50	5,41	5,47	-1,86	-1,09
91,60	5,42	5,47	-1,68	-0,88
91,70	5,42	5,47	-1,45	-0,64

91,80	5,42	5,47	-1,13	-0,37
91,90	5,43	5,47	-0,80	-0,09
92,00	5,44	5,46	-0,42	0,19
92,10	5,45	5,46	-0,01	0,47
92,20	5,46	5,46	0,41	0,73
92,30	5,46	5,46	0,79	0,96
92,40	5,47	5,46	1,17	1,16
92,50	5,48	5,45	1,50	1,29
92,60	5,48	5,45	1,79	1,37
92,70	5,49	5,45	2,02	1,40
92,80	5,49	5,46	2,17	1,38
92,90	5,50	5,46	2,25	1,32
93,00	5,50	5,46	2,24	1,24
93,10	5,50	5,46	2,15	1,11
93,20	5,50	5,47	1,98	0,95
93,30	5,50	5,47	1,68	0,74
93,40	5,49	5,48	1,24	0,47
93,50	5,49	5,48	0,71	0,14
93,60	5,48	5,48	0,16	-0,20
93,70	5,47	5,48	-0,40	-0,56
93,80	5,46	5,49	-0,92	-0,85
93,90	5,45	5,49	-1,35	-1,06
94,00	5,44	5,49	-1,66	-1,24
94,10	5,43	5,49	-1,88	-1,34
94,20	5,43	5,49	-2,05	-1,40
94,30	5,42	5,49	-2,15	-1,40
94,40	5,42	5,49	-2,18	-1,35
94,50	5,42	5,49	-2,14	-1,26
94,60	5,42	5,49	-2,01	-1,10
94,70	5,43	5,49	-1,79	-0,87
94,80	5,44	5,49	-1,51	-0,62
94,90	5,45	5,49	-1,17	-0,34
95,00	5,46	5,49	-0,77	-0,06
95,10	5,47	5,49	-0,35	0,22
95,20	5,48	5,49	0,10	0,50
95,30	5,49	5,49	0,53	0,75
95,40	5,50	5,49	0,94	0,99
95,50	5,51	5,49	1,33	1,18
95,60	5,52	5,49	1,67	1,30
95,70	5,52	5,49	1,96	1,37
95,80	5,53	5,49	2,18	1,39
95,90	5,53	5,50	2,32	1,37
96,00	5,54	5,50	2,39	1,30
96,10	5,54	5,51	2,35	1,21
96,20	5,54	5,51	2,22	1,03
96,30	5,54	5,52	1,86	0,71

96,40	5,54	5,52	1,38	0,32
96,50	5,54	5,52	0,81	-0,10
96,60	5,53	5,52	0,20	-0,50
96,70	5,52	5,52	-0,40	-0,90
96,80	5,50	5,52	-0,97	-1,20
96,90	5,49	5,52	-1,48	-1,32
97,00	5,48	5,52	-1,82	-1,40
97,10	5,47	5,52	-2,00	-1,41
97,20	5,46	5,52	-2,12	-1,40
97,30	5,45	5,52	-2,18	-1,34
97,40	5,45	5,52	-2,16	-1,22
97,50	5,45	5,52	-2,06	-1,03
97,60	5,46	5,53	-1,88	-0,80
97,70	5,46	5,53	-1,63	-0,55
97,80	5,47	5,53	-1,31	-0,29
97,90	5,48	5,53	-0,96	-0,01
98,00	5,49	5,53	-0,56	0,27
98,10	5,50	5,54	-0,13	0,54
98,20	5,52	5,54	0,32	0,78
98,30	5,53	5,54	0,75	1,00
98,40	5,54	5,54	1,14	1,19
98,50	5,55	5,54	1,51	1,34
98,60	5,56	5,54	1,81	1,43
98,70	5,57	5,55	2,06	1,46
98,80	5,58	5,55	2,24	1,43
98,90	5,58	5,55	2,36	1,35
99,00	5,59	5,55	2,38	1,12
99,10	5,59	5,56	2,23	0,76
99,20	5,59	5,56	1,83	0,36
99,30	5,59	5,55	1,31	-0,09
99,40	5,58	5,55	0,74	-0,53
99,50	5,57	5,55	0,15	-0,90
99,60	5,55	5,54	-0,47	-1,19
99,70	5,54	5,54	-1,04	-1,32
99,80	5,52	5,53	-1,52	-1,37
99,90	5,50	5,53	-1,83	-1,39
100,00	5,49	5,52	-1,97	-1,38
100,10	5,48	5,52	-2,07	-1,31
100,20	5,47	5,52	-2,10	-1,20
100,30	5,46	5,52	-2,06	-1,03
100,40	5,46	5,52	-1,94	-0,84
100,50	5,46	5,52	-1,77	-0,61
100,60	5,46	5,52	-1,52	-0,37
100,70	5,47	5,53	-1,23	-0,12
100,80	5,48	5,53	-0,90	0,14
100,90	5,49	5,53	-0,52	0,41

101,00	5,50	5,53	-0,13	0,65
101,10	5,51	5,53	0,29	0,86
101,20	5,53	5,54	0,69	1,06
101,30	5,54	5,54	1,08	1,23
101,40	5,55	5,54	1,43	1,36
101,50	5,56	5,54	1,72	1,43
101,60	5,57	5,54	1,97	1,46
101,70	5,58	5,55	2,16	1,41
101,80	5,58	5,55	2,28	1,33
101,90	5,59	5,55	2,32	1,12
102,00	5,59	5,55	2,25	0,77
102,10	5,59	5,55	1,92	0,39
102,20	5,59	5,55	1,45	-0,04
102,30	5,58	5,55	0,88	-0,47
102,40	5,57	5,54	0,31	-0,84
102,50	5,56	5,54	-0,28	-1,12
102,60	5,54	5,53	-0,84	-1,26
102,70	5,52	5,52	-1,33	-1,33
102,80	5,51	5,52	-1,66	-1,36
102,90	5,49	5,51	-1,84	-1,37
103,00	5,48	5,51	-1,96	-1,34
103,10	5,46	5,51	-2,02	-1,27
103,20	5,46	5,51	-2,02	-1,13
103,30	5,45	5,51	-1,95	-0,97
103,40	5,45	5,51	-1,82	-0,76
103,50	5,45	5,51	-1,63	-0,54
103,60	5,45	5,51	-1,38	-0,30
103,70	5,46	5,51	-1,08	-0,05
103,80	5,47	5,51	-0,74	0,20
103,90	5,48	5,51	-0,36	0,45
104,00	5,49	5,51	0,02	0,70
104,10	5,50	5,51	0,40	0,91
104,20	5,51	5,51	0,79	1,11
104,30	5,52	5,51	1,17	1,28
104,40	5,53	5,52	1,48	1,40
104,50	5,54	5,52	1,77	1,45
104,60	5,55	5,52	2,01	1,46
104,70	5,55	5,52	2,17	1,42
104,80	5,56	5,53	2,27	1,34
104,90	5,56	5,53	2,29	1,20
105,00	5,56	5,53	2,21	0,94
105,10	5,56	5,53	1,93	0,57
105,20	5,56	5,53	1,49	0,17
105,30	5,56	5,53	0,96	-0,25
105,40	5,55	5,53	0,38	-0,63
105,50	5,54	5,53	-0,19	-0,99

105,60	5,53	5,52	-0,75	-1,21
105,70	5,51	5,52	-1,24	-1,31
105,80	5,50	5,52	-1,61	-1,37
105,90	5,48	5,51	-1,81	-1,38
106,00	5,47	5,51	-1,93	-1,37
106,10	5,46	5,51	-2,01	-1,32
106,20	5,46	5,51	-2,02	-1,22
106,30	5,45	5,51	-1,97	-1,04
106,40	5,45	5,51	-1,84	-0,85
106,50	5,45	5,51	-1,65	-0,61
106,60	5,46	5,51	-1,40	-0,37
106,70	5,47	5,51	-1,10	-0,10
106,80	5,47	5,51	-0,77	0,16
106,90	5,48	5,51	-0,40	0,43
107,00	5,49	5,51	-0,01	0,69
107,10	5,50	5,51	0,38	0,93
107,20	5,51	5,51	0,79	1,13
107,30	5,52	5,51	1,15	1,30
107,40	5,53	5,51	1,50	1,41
107,50	5,54	5,51	1,78	1,46
107,60	5,55	5,52	2,01	1,47
107,70	5,55	5,52	2,18	1,43
107,80	5,56	5,52	2,28	1,34
107,90	5,56	5,52	2,29	1,20
108,00	5,56	5,53	2,19	0,88
108,10	5,56	5,53	1,88	0,50
108,20	5,56	5,53	1,40	0,08
108,30	5,55	5,53	0,88	-0,34
108,40	5,54	5,53	0,32	-0,74
108,50	5,53	5,52	-0,24	-1,09
108,60	5,52	5,52	-0,80	-1,31
108,70	5,50	5,52	-1,28	-1,39
108,80	5,49	5,51	-1,64	-1,43
108,90	5,48	5,51	-1,83	-1,44
109,00	5,47	5,51	-1,96	-1,41
109,10	5,46	5,51	-2,03	-1,33
109,20	5,45	5,51	-2,04	-1,20
109,30	5,45	5,51	-1,98	-1,03
109,40	5,45	5,51	-1,85	-0,82
109,50	5,46	5,52	-1,67	-0,58
109,60	5,46	5,52	-1,41	-0,33
109,70	5,47	5,52	-1,11	-0,06
109,80	5,48	5,52	-0,78	0,20
109,90	5,49	5,52	-0,39	0,47
110,00	5,50	5,52	-0,01	0,71
110,10	5,52	5,52	0,40	0,93

110,20	5,53	5,52	0,79	1,13
110,30	5,54	5,52	1,15	1,29
110,40	5,54	5,52	1,49	1,39
110,50	5,55	5,52	1,76	1,43
110,60	5,56	5,52	1,99	1,42
110,70	5,56	5,52	2,15	1,36
110,80	5,56	5,52	2,24	1,26
110,90	5,56	5,52	2,24	1,10
111,00	5,56	5,52	2,15	0,81
111,10	5,56	5,52	1,83	0,44
111,20	5,55	5,52	1,38	0,04
111,30	5,55	5,52	0,84	-0,36
111,40	5,54	5,52	0,27	-0,73
111,50	5,52	5,52	-0,29	-1,04
111,60	5,51	5,51	-0,81	-1,21
111,70	5,49	5,51	-1,27	-1,31
111,80	5,48	5,51	-1,58	-1,37
111,90	5,47	5,51	-1,76	-1,40
112,00	5,45	5,51	-1,91	-1,39
112,10	5,45	5,51	-1,99	-1,35
112,20	5,44	5,51	-2,03	-1,25
112,30	5,44	5,51	-2,00	-1,10
112,40	5,44	5,51	-1,89	-0,90
112,50	5,45	5,51	-1,72	-0,69
112,60	5,45	5,51	-1,50	-0,47
112,70	5,46	5,51	-1,22	-0,20
112,80	5,47	5,52	-0,90	0,06
112,90	5,48	5,52	-0,53	0,31
113,00	5,50	5,52	-0,16	0,56
113,10	5,51	5,52	0,23	0,79
113,20	5,52	5,52	0,64	0,99
113,30	5,53	5,52	1,00	1,17
113,40	5,54	5,52	1,33	1,32
113,50	5,55	5,52	1,63	1,41
113,60	5,55	5,52	1,87	1,43
113,70	5,56	5,52	2,06	1,40
113,80	5,56	5,52	2,18	1,33
113,90	5,56	5,52	2,22	1,23
114,00	5,56	5,52	2,18	1,09
114,10	5,56	5,52	2,04	0,83
114,20	5,56	5,52	1,68	0,49
114,30	5,55	5,52	1,21	0,10
114,40	5,54	5,52	0,67	-0,29
114,50	5,53	5,52	0,10	-0,67
114,60	5,52	5,51	-0,45	-0,98
114,70	5,50	5,51	-0,94	-1,16

114,80	5,49	5,51	-1,35	-1,27
114,90	5,47	5,51	-1,59	-1,35
115,00	5,46	5,51	-1,76	-1,38
115,10	5,45	5,51	-1,90	-1,39
115,20	5,44	5,51	-1,98	-1,35
115,30	5,44	5,51	-1,99	-1,24
115,40	5,44	5,51	-1,94	-1,10
115,50	5,44	5,51	-1,81	-0,89
115,60	5,44	5,51	-1,61	-0,67
115,70	5,45	5,51	-1,37	-0,43
115,80	5,46	5,51	-1,07	-0,17
115,90	5,47	5,51	-0,72	0,10
116,00	5,48	5,51	-0,36	0,36
116,10	5,49	5,51	0,03	0,61
116,20	5,50	5,51	0,44	0,84
116,30	5,51	5,51	0,81	1,05
116,40	5,52	5,51	1,17	1,23
116,50	5,53	5,50	1,50	1,37
116,60	5,54	5,51	1,77	1,43
116,70	5,55	5,51	2,00	1,45
116,80	5,55	5,51	2,15	1,41
116,90	5,55	5,51	2,23	1,34
117,00	5,55	5,51	2,23	1,22
117,10	5,55	5,51	2,15	1,05
117,20	5,55	5,52	1,90	0,77
117,30	5,55	5,52	1,47	0,39
117,40	5,54	5,52	0,95	-0,03
117,50	5,54	5,52	0,39	-0,44
117,60	5,52	5,52	-0,18	-0,80
117,70	5,51	5,51	-0,72	-1,09
117,80	5,50	5,51	-1,19	-1,25
117,90	5,48	5,51	-1,55	-1,34
118,00	5,47	5,51	-1,75	-1,39
118,10	5,46	5,51	-1,91	-1,40
118,20	5,45	5,51	-2,00	-1,37
118,40	5,44	5,51	-2,04	-1,14
118,50	5,44	5,51	-2,00	-0,94
118,60	5,44	5,51	-1,88	-0,72
118,70	5,45	5,51	-1,70	-0,47
118,80	5,45	5,51	-1,44	-0,19
118,90	5,46	5,51	-1,14	0,10
119,00	5,47	5,51	-0,78	0,36
119,10	5,48	5,51	-0,39	0,64
119,20	5,49	5,51	0,00	0,88
119,30	5,50	5,51	0,43	1,10
119,40	5,51	5,52	0,82	1,28

119,50	5,52	5,52	1,19	1,41
119,60	5,53	5,52	1,54	1,47
119,70	5,54	5,52	1,82	1,48
119,80	5,55	5,52	2,06	1,44
119,90	5,55	5,52	2,22	1,36
120,00	5,56	5,52	2,31	1,21