

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

JŪROS TECHNOLOGIJŲ IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

JŪRŲ INŽINERIJOS KATEDRA

**KU MOKSLINIŲ TYRIMŲ LAIVO IŠILGINIO SUPIMOSI
MAŽINIMO TYRIMAI**

Laivybos ir uosto inžinerijos (6211EX066) specialybės Laivų
projektavimas ir statyba specializacijos magistro baigiamasis darbas

Darbą atliko:

JMNLU1-18 gr. stud. Kornelija Grikšaitė

Vadovas:

doc. dr. Rima Mickevičienė

Klaipėda, 2020

Santrauka

Grikšaitė K., KU mokslinių tyrimų laivo išilginio supimosi mažinimo tyrimai. Darbo vadovas – doc. dr. R. Mickevičienė, konsultuojantis dėstytojas – doc. dr. V. Djačkov., Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2020. – 73 psl.

Magistratūros baigiamajame darbe atliekamas mokslinio tyrimo KU laivo „Mintis“ išilginio supimosi stabilizavimo tyrimas.

Darbe apžvelgiami moksliniai tyrimai, kur nagrinėjama laivų išilginio supimosi teorija, daugiakorpusio laivų išilginis supimasis bei jūrinių savybių gerinimas.

Pirmoje darbo dalyje analizuojama katamaranų supimosi problema, analizuojamas galimas šios problemos mažinimas ar šalinimas, išanalizuojamos stabilizavimo priemonės ir aptariamas šių priemonių įdiegimas mokslinių tyrimų laivui „Mintis“.

Antroje dalyje aptariama linijinė katamaranų supimosi teorija ir formulės bei formulių dedamosios. Šiame skyriuje užrašomos patikslintos laivo supimosi formulės, kurių pagrindu atliekami matematiniai supimosi eksperimentai.

Sekančioje dalyje atliekami išilginio supimosi skaičiavimai, aprašomas eksperimentas. Skaičiavimai atliekami linijinės laivo supimosi teorijos pagrindais ir naudojant skaičiuojamąją skysčių dinamikos programą „FLOW – 3D“.

Darbo pabaigoje atliekamas rezultatų susistemimas ir palyginimas tarpusavyje iš anksčiau atliktų tyrimų. Aprašomas povandeninių sparnų efektyvumas.

Raktiniai žodžiai: katamaranas, išilginis supimasis, supimosi slopinimas, linijinė laivo supimosi teorija, FLOW – 3D, skaičiuojamoji skysčių dinamika.

Summary

Grikšaitė K., KU scientific – The Research on Reduction of Longitudinal Ship Motions of KU Scientific Research Vessel. The supervising tutor – assoc. prof. dr. R. Mickevičienė, the advising lecturer – assoc. dr. V. Djačkov, Klaipėda University: Klaipėda, 2020. – 73 p.

Research on the longitudinal roll stabilization of the KU ship „Mintis” in the Master's Thesis.

The paper reviews research, examines the theory of longitudinal support of ships, longitudinal torsion of multi - hull ships and the improvement of marine properties.

In the first part of the Master's Thesis work the scientific analysis is performed, which is aimed at finding out the answers to the questions related with the pitching and the heaving as well as the analysis of the factor which have influence over that marine features being carried out.

In the second part of work the linear theory of the catamaran pitching and heaving, the theory comprising formulas and their components are being analysed. In the part of this work more precise formulas of the vessel pitching and heaving are recorded, on the basis of which mathematical pitching and heaving experiments are being carried out.

In the next part, longitudinal torsion calculations are performed, and the experiment is described. Calculations are performed on the basis of linear ship roll theory and using the calculated fluid dynamics program „FLOW – 3D”.

In the last part, the results are systemized and analysed as well as they are being compared between. Efficiency of applied underwater fins is analysed.

Keywords: catamaran, longitudinal roll, rollover damping, linear ship roll theory, FLOW – 3D, computational fluid dynamics.



Laivybos ir uostų inžinerijos specialybės Laivų projektavimas ir statyba specializacijos magistro studijų baigiamasis darbas

Magistro tezes: **KU mokslinių tyrimų laivo išilginio supimosi mažinimo tyrimai**
The Research on Reduction of Longitudinal Ship Motions of KU Scientific Reseach Vessel

Magistrantė: **Kornelija Grikšaitė**

Darbo sudėtis

1. Titulinis lapas (viršelis)
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sarašas
5. Paveikslelių sarašas
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 mokslinio-tiriamąjo laivo supimosi skaičiavimai pagal linijines laivo išilginio supimosi teorijos metodiką
 - 11.2. KU Mokslinio-tiriamąjo laivo supimosi skaičiavimai naudojant CFD programinę įrangą
12. Skaičiavimo rezultatų duomenų palyginimas bei analizė
13. Išvados
14. Literatūros sarašas
15. Priedai

Užduotis išduota: 2019.11.28

Darbo vadovas: doc. dr. Rima Mickevičienė

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Prijungtųjų masių ir supimosi dempferavimo koeficientai.	18
2 lentelė. Pagrindiniai laivo techniniai duomenys.....	28
3 lentelė. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos.....	32
3 lentelės tęsinys. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos.....	33
4 lentelė. Laivo ir supimosi sparnų parametrų nustatymas.....	33
5 lentelė. Španhautų charakteristika.....	34
6 lentelė. Španhautų charakteristika.....	35
7 lentelė. Skaičiavimo rezultatai.....	36
8 lentelė. Laivapriekinio sparno charakteristikos.....	38
9 lentelė. Laivapriekinio ir laivagalinio sparno charakteristikos.....	45

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Laivo supimosi tipai pagal kryptis ir ašis.....	13
2 pav. Reguliarios bangos profilis.....	15
3 pav. Horizontalaus katamarano klirensa nuo prijungtosios masės koeficiento priklausomybė.....	22
4 pav. Greitaeigių katamaranų povandeninių sparnų schemas.....	25
5 pav. Katamarano povandeninio sparno tvirtinimo schema: a) iš šono, b) iš priekio	25
6 pav. KU mokslinių tyrimų laivas „ <i>Mintis</i> “	28
7 pav. A. Žemaitytės darbe tiriamų sparnų eskizas.....	30
8 pav. „ <i>Mintis</i> “ laivo projektuojamo vieno korpuso dalis su sparnais (eskizas).....	30
9 pav. Projektuojamų sparnų eskizas.....	31
10 pav. Kompiuterinės programos visų galimų atlikti skaičiavimų algoritmas.....	32
11 pav. KU mokslinio – tiriamojo laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas.....	38
12 pav. KU mokslinio – tiriamojo laivo supimosi pobūdis įvairiais laiko momentais.....	38
13 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio.....	39
14 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalaus supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos.....	40
15 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio.....	40
16 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalaus supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos.....	41
17 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio.....	41
18 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalaus supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos.....	42
19 pav. 12,8 m, 14,8 m ir 16,8 m atstumu, vertikalaus supimosi priklausomybės nuo dažnio palyginimas.....	43
20 pav. 12,8 m, 14,8 m ir 16,8 m atstumu išilginio supimosi priklausomybės nuo dažnio palyginimas.....	44
21 pav. „ <i>Mintis</i> “ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 14,8 m, denio užliejimo grafikas.....	45
22 pav. „ <i>Mintis</i> “ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 16,8 m, denio užliejimo grafikas.....	45
23 pav. „ <i>Mintis</i> “ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 12,8 m, denio užliejimo grafikas.....	46

24 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio.....	46
25 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais katamarano vertikalaus supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos.....	47
26 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio.....	47
27 pav. 4 tinklelių nustatymo vaizdas.....	50
28 pav. Tinklelio sienelių nustatymai.....	51
29 pav. Vertikalusis laivo „Mintis“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais.....	53
30 pav. Kilinis laivo „Mintis“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais.....	54
31 pav. Analizuojami vertikalaus supimosi „ <i>FLOW – 3D</i> “ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 1“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).....	54
32 pav. Analizuojami kilinio supimosi „ <i>FLOW – 3D</i> “ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 1“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).....	55
33 pav. Vertikalusis laivo „Mintis“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais.....	56
34 pav. Kilinis laivo „Mintis“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais.....	56
35 pav. Analizuojami vertikalaus supimosi „ <i>FLOW – 3D</i> “ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 2“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).....	57
36 pav. Analizuojami kilinio supimosi „ <i>FLOW – 3D</i> “ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 2“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).....	57

TURINYS

ĮVADAS	8
1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ KATAMARANO SUPIMOSI APŽVALGA	10
2. KATAMARANŲ SUPIMOSI STABILIZAVIMAS	13
2.1. Katamaranų supimosi problemos.....	13
2.2. Linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizė.....	16
2.3. Katamaranų supimosi sprendimas.....	20
2.4. Katamaranų judėjimą nusakančios patikslintosios lygtys, esant reguliariam bangavimui.....	21
2.4.1. Stabilizavimo įrenginiai.....	23
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	26
3.1. Tiriamojo objekto – Klaipėdos universiteto mokslinio tyrimų laivo „Mintis“ aprašymas.....	26
3.2. Stabilizauojančio sparno projektavimas.....	29
3.3. Laivų išilginio supimosi kompiuterinė programa.....	30
3.3.1. KU mokslinio – tiriamojo laivo supimosi skaičiavimai naudojant laivų išilginio supimosi kompiuterinę programą.....	32
3.4. KU Mokslinio – tiriamojo laivo supimosi skaičiavimai naudojant „FLOW – 3D“ programinę įrangą.....	47
3.4.1. Pirmas laivo supimosi stabilizavimo tyrimo atvejis.....	52
3.4.2. Antras laivo supimosi stabilizavimo tyrimo atvejis.....	54
4. REZULTATŲ ANALIZĖ	57
IŠVADOS	58
REKOMENDACIJOS	59
LITERATŪROS SĄRAŠAS	60
PRIEDAI	63

IVADAS

Katamaranas – tai daugiakorpūs laivas, turintis du lygiagrečius, tilteliais sujungtus, simetriškus korpusus. Lyginant su vienkorpūsiais laivais (tokių pat parametru) katamaranai turi didesnę denio plotą ir yra greitesni. Greitaeigiai katamaranai, skirtingai nuo vienkorpūslių laivų, turi siaurus bei ilgus korpusus, kurie lemia geras jų eigumo savybes. Tačiau išilginio supimosi sąlygomis sumažėja keleivių komfortas, plaukiama lėčiau, bangų smūginės apkrovos tampa stipresnės ir dažnesnės. [5].

Didžioji dalis katamaranų yra keleiviniai ar kroviniai keltai, bet dabar vis daugiau atsiranda katamaranų, kurie naudojami specialiai paskirčiai, pavyzdžiui – moksliniams vandenynų ir jūrų tyrimams. Didelis denis katamaranams suteikia platesnes galimybes kuo racionaliau išnaudoti jų mokslinių tyrimų laboratorijoms, taip pat suteikia galimybę visame denio plote montuoti gerves, kranus, taip pat kitą mokslinę įrangą. Viena iš pagrindinių priežasčių, ribojančių greitaeigių katamaranų pritaikymą ir naudojimą, nepaisant visų privalumų yra jūrinės savybės. Katamaranų išilginis supimasis yra toks pat, o neretai ir dar blogesnis nei vienkorpūslių laivų.

Supimasis – svyravimai pusiausvyros padėties atžvilgiu. Supimasis yra neigiamas reiškinys, kuris pablogina laivo eigumą, valdomumą, plūdrumą ir stovumą. Vykstant supimuisi gali būti trikdomas normalus mechanizmų ir įrenginių darbas, gali pasislinkti kroviniai, galimas nenormalus laivo eksploatavimas ir kiti padariniai. [14, 34].

Išilginį laivo supimąsi sudaro kilinis ir vertikalus, todėl šis supimosi tyrimas yra svarbiausias katamaranų tyrimo uždavinių. Vienas iš būdų sumažinti išilginį supimąsi, tai įrengti povandeninius sparnus, kurie veiktų, kaip supimosi slopintuvai. Katamaranuose povandeniniai sparnai jungiasi tarp dviejų korpusų, dėl to nėra jokių atsikišusių dalių už korpuso ir visai netrukdo švartavimuisi. Povandeniniai sparnai gali būti pasyvūs arba aktyvūs. Pasyvūs nuo aktyvių skiriasi tuo, kad pasyvūs yra stacionariai pritvirtinti prie korpuso, o aktyviuose sparnuose yra valdomas jų posvyrio kampas. Stabilizavimo įrenginio parinkimas įtakoja nagrinėjamo laivo tipą, jo formą, navigacinius bei laivo techninius parametrus. Supimosi tyrimas ir jo mažinimas, parenkant ir pritaikant kuo efektyvesnes priemones, yra viena iš svarbiausių greitaeigių katamaranų projektavimo bei eksploatavimo uždavinių. Apie katamaranų kilinį supimąsi nėra sukaupta daug žinių, todėl ši jūrinė savybė turėtų būti iširta nuosekliau.

Tyrimo aktualumas. Atliekant hidrografinius darbus bei matavimus yra labai svarbu išlaikyti kuo mažesnes supimosi amplitudes, kurios įtakoja matavimo rezultatų tikslumą. Taip pat svarbios priežastys, yra kuro sąnaudų mažinimas, krovinio bei pačio laivo saugumo didinimas ir komforto gerinimas. Todėl laivo (daugiakorpūsio) išilginio supimosi amplitudžių mažinimas yra vienas iš svarbiausių uždavinių gerinant laivo eksploatacines charakteristikas.

Tyrimo objektas. KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ išilginis supimasis.

Tyrimo tikslas. Optimizuoti katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi stabilizavimo priemones, naudojant Microsoft Office Excel ir skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programines įrangas.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinius darbus;
2. Aprašyti katamaranų išilginio supimosi mažinimo sprendimų paieškos būdą/-us;
3. Sudaryti išilginio supimosi stabilizavimo įrenginio optimizavimo skaitinį eksperimentą;
4. Atlikti skaičiavimus naudojant SSD programinę įrangą ir juos palyginti su A. Žemaitytės „KU tyrimų laivo kilinio ir vertikalaus supimosi stabilizavimo įrenginio optimizavimo tyrimai“ darbe gautais tyrimo rezultatais;
5. Palyginti tarpusavyje MS Excel ir SSD programinių įrangų rezultatus.

Tyrimo metodai:

1. Skaitinis eksperimentas taikant linijinę laivo supimosi metodiką;
2. Skaitinis eksperimentas naudojant SSD programinę įrangą.

1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ KATAMARANO SUPIMOSI APŽVALGA

Pirmieji tyrimai susiję su katamaranais buvo atlikti XX – to amžiaus 7 – me dešimtmetyje. Analizuojant įvairių daugiakorpusių laivų tipų jūrines savybes, pabrėžiamos problemos kylančios, esant išilginiam supimuisi. Mokslininkai [38] atliko jūrinių savybių charakteristikų tyrimus skirtingiems daugiakorpusių laivų tipams. Atlikdavo eksperimentus ir kurdavo metodiką daugiakorpusių laivų inercinių charakteristikų nustatymui.

Pateikia [42] katamarano prijungtųjų masių skaičiavimo metodiką bei eksperimento būdu priėjo išvados, kad jei atstumas tarp katamarano korpusų bortų yra lygus vieno korpuso pločiui, tai katamarano pridėtinė inercija išauga vidutiniškai 20% dėl hidrodinaminės korpusų įtakos.

Daugiakorpusių laivų inercinių jėgų ir momentų nustatymu toliau užsiiminėjo [19, 32], aliekant modelinius bandymus jūrinių savybių tyrimus baseinuose. Mokslininkai pasiūlė metodą aukščiau minėtų charakteristikų vertinimui, tačiau pasiūlytas metodas nėra pateikiamas vertinant katamaranų jūrines savybes, kurio Frūdo skaičius yra didesnis negu 0,3.

Katamarano supimosi charakteristikas taip pat tiria [39], jis skiria ypatingą dėmesį daugiakorpusių laivų išilginiam supimuisi ir jo mažinimui. Autorius analizuoja greitaeigio katamarano stabilizavimo atvejį. Tyrimas parodė, kad supimosi stabilizavimas naudojant gembinius sparnus turi trūkumus: vibraciją sparnų galuose bei jų stiprumo užtikrinimą.

Nemažai mokslininkų dirbo laivų supimosi stabilizavimo srityje. Nemažą indėlį į laivų supimosi stabilizavimo teoriją idėjo [33]. Autorių siūlomas metodas leidžia įvertinti vienkorpusiams laivams taikomų stabilizavimo priemonių efektyvumą.

Ta pačia tematika dirbo [9] tirdami vienkorpusių laivų jūrines savybes. Jų tyrimai ir siūlomi metodai leidžia įvertinti laivo supimosi charakteristikas bei supimosi amplitudžių sumažėjimą. Šiuos tyrimo rezultatus būtų galima panaudoti mūsų tyrime sudarant matematinio eksperimento sąlygas.

Laivo supimosi charakteristikos nemaža dalis priklauso nuo laivo korpuso formos. Daugelis mokslininkų tyrė supimosi amplitudžių priklausomybę nuo laivo korpuso geometrinių ir formos charakteristikų. Tokiuose darbuose, kaip [8, 17, 25] skirtinguose laivo geometrinės formos skiriamos prie skirtingų bandymo sąlygų: laivo greitis ir eigos kryptis, bangavimo intensyvumas. Iš gautų rezultatų, analizuojamos apkrovos, į laivo korpusą vandens pasipriešinimas laivo judėjimui, stovumo, pastovumo kurse bei bangavimo charakteristikos.

Daugelis mokslininkų nagrinėja skirtingas laivo jūrines savybes naudojant skaitmenines skysčių dinamikos programines įrangas. Viena iš tokių programinių įrangų yra CFDShip – Iowa. Jos pagalba mokslininkai kuria ir tobulina modeliavimo bei skaičiavimo metodikas, taikomas laivo supimuisi, manevringumui, pasipriešinimui, nesąveikavimui. [4].

Paskutiniu metu mokslininkai vis dažniau naudoja skaičiuojamosios skysčių dinamikos programas jūrinėms savybėms tirti. Tokios programos tapo prieinamu įrankiu, palyginus su eksperimentais baseine arba natūriniais bandymais, leidžiančių modeliuoti ir analizuoti skirtingų laivų judėjimą, bet kokiomis jūros būklės sąlygomis. Skaičiavimai atliekami CFD – ANSYS AQUA programa leidžia pasiekti gerus tyrimų rezultatus su nežymiais nukrypimais [29]. Autoriai rekomenduoja naudoti skaičiuojamosios skysčių dinamikos programą laivų jūrinių savybių tyrimams.

Esant galimybei mokslininkai atlieka tyrimus bandymų baseinuose ar net natūrinius eksperimentus. Daugiakorpusiams laivams pasireiškia korpusų sudarytų bangų interferencija, kuri įtakoja jų jūrinės savybes. Savo tyrimuose [4, 12, 24, 31] mokslininkai atlieka eksperimentus, kaip su katamaranais taip ir su trimaranais skirtingų greičių diapazone ir esant skirtingoms jūros būklės sąlygoms. Gauti rezultatai gali padėti greitujų katamaranų projektuotojams vertinant hidrodinamines charakteristikas pagal skirtingus greičio režimus ir korpuso matmenis.

Kai kuriuose eksperimentuose [30] mokslininkai naudoja laivapriekinius povandeninius sparnus. Natūrinio eksperimento metu analizuojamos jėgos veikiančios sparną ir jų priklausomybė nuo sparno formos, laivo judėjimo greičio bei bangavimo intensyvumo. Galima būtų atsižvelgti į šiuos tyrimo rezultatus formuojant mūsų tyrimo eksperimentus, nors sparnų konstrukcija sudėtingėja dėl šarnyrinių sujungimų ir spyruoklių, kas neigiamai įtakos įrenginio eksploataciją.

Mokslininkai atlieka serijinius tyrimus [15] tam, kad nustatyti hidrodinamines jėgas veikiančias daugiakorpusius laivus ir išsiaiškinti jų priklausomybę nuo laivo geometrinių charakteristikų. Atlikti serijiniai bandymai ir išsami analizė, kurių tikslas yra surišti nagrinėjamas charakteristikas.

Katamaranų stovumui pagerinti kartais naudojama [13] balastinės sistemos konstrukcija, skirta katamaranų saugumui ir patogumui užtikrinti, sukuriant kiekvieno komponento matematinį balasto sistemos modelį. Nagrinėjama naudojant programinę įrangą MATLAB, norint gauti trumpalaikį sistemos atsaką, kai laivas pakrypsta į šoną, sistema turėtų automatiškai įsijungti. Su balasto sistemos automatikos sistema tikimasi, kad laivo judėjimas veiks automatiškai ir geriau reaguos į katamarano tipo laivų stabilumą.

Šiame magistro baigiamajame darbe bus pratęstas tyrimas [5], kuriame buvo sudarytos daugiakorpusių stabilizuotų laivų supimosi vertinimo lygtys. Sukurtas metodas leidžia įvertinti daugiakorpusių laivų išilginio supimosi amplitudes bei nustatyti panaudotų supimosi stabilizavimo priemonių efektyvumą. Šiame moksliniame darbe sukurta metodika gali būti panaudota mūsų tyrime sudarant matematinį eksperimentą.

Nuo 2016 metų atlikta tyrimų eilė siekiant patvirtinti stabilizuotų katamaranų skaičiavimo metodikos tikslumą. Magistro baigiamajame darbe [21] atlikti: KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ skaičiavimas pagal sukurtą katamaranų supimosi vertinimo metodiką, matematinis eksperimentas

skaičiuojamosios skysčių dinamikos programos „FLOW – 3D“ bei natūrinis laivo supimosi amplitudžių matavimo eksperimentas. Atlikto tyrimo rezultatai parodė gerą skaičiavimų ir natūrinio eksperimento rezultatų suderinamumą.

Sekančiu etapu magistro baigiamajame darbe [20] skaičiuojamosios skysčių dinamikos programos pagalba laivui „Mintis“ buvo sumodeliuotas laivapriekinis sparnas, įrengtas tarp korpusų. Taip pat atlikti skaičiavimai pagal stabilizuoto katamarano supimosi vertinimo metodiką. Dviejų eksperimentų rezultatai buvo palyginti ir parodė gerą tarpusavyje derinamumą. Šiuo tyrimo rezultatai labai svarbūs mūsų tyrimui ir formuojant tyrimo eksperimentus atsižvelgsime į šiuos tyrimo rezultatus.

Tęsiant, kad laivo „Mintis stabilizavimo tyrimus magistro baigiamajame darbe [22] yra pritaikyti pusmėnulio formos sparnai laivapriekyje. Pasiūlyta sparnų forma yra optimalesnė iš technologinės pusės ir nesudaro problemų laivo konstrukcijos stiprumo požiūriu. Darbe ištirtas katamarano išilginis supimasis, naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programinę įrangą. Modeliuojant išilginį supimąsi įvertintas stabilizavimo priemonių efektyvumas. Mūsų tyrime atsižvelgsime į šio tyrimo sąlygas ir naudosime jau suformuoto matematinio modelio parametrus, o gautus rezultatus lyginsime su šiuo tyrimo rezultatais tam, kad įvertinti pasiūlytų supimosi slopinimo priemonių efektyvumą.

Atlikta nemažai mokslinių tyrimų, susijusių su katamaranų supimosi teorija, taip pat su įvairiais faktoriais darančiais įtaką jų jūrinėms savybėms. Iškelta nemažai idėjų, kaip būtų galima sumažinti katamarano išilginį supimąsi ir atlikta eksperimentų su šiomis idėjomis. Tačiau trūksta autorių, kurie atliktų katamaranų analizę su povandeniniais sparnais praktinius eksperimentus, taip pat visų tyrimų rezultatų palyginimą, kuris padėtų įvertinti tarpusavio tikslumą ir paklaidas. Nustatyta, kad SSD programinė įranga yra patikima atlikti jūrų transporto eksperimentinius bandymus. SSD programa būtų galima atlikti katamarano su povandeniniais sparnais bei stabilizavimo priemone esant reguliariam bangavimui eksperimentą. Toliau rezultatus palyginti su tokiomis pat bangavimo sąlygomis ir tuo pačiu laivu, tik skirtingose vietose suprojektuotais sparnais stabilizavimo bandymo rezultatais. Būtų galima nustatyti pasirinkto sprendimo efektyvumą.

2. KATAMARANŲ SUPIMOSI STABILIZAVIMAS

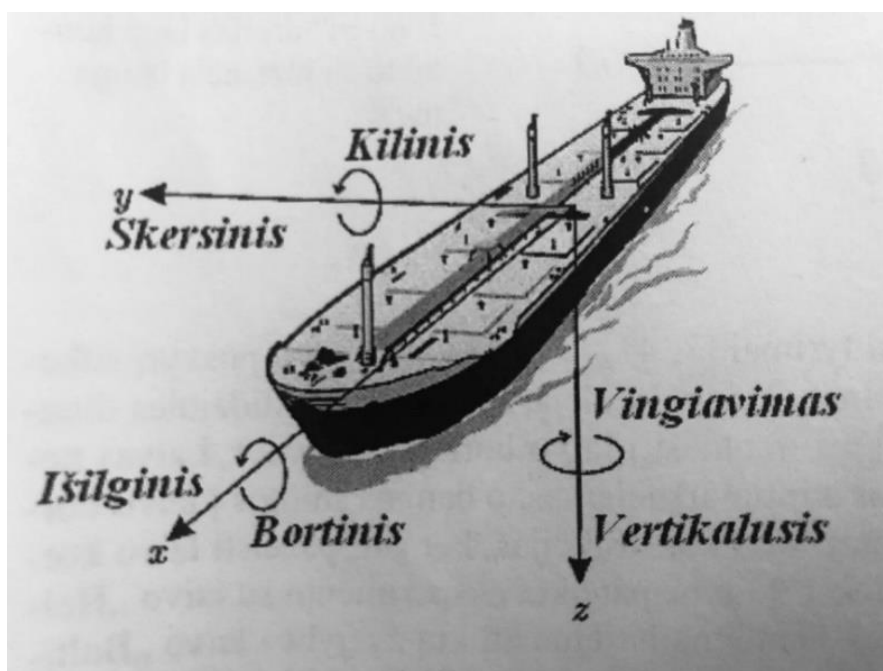
Katamaranas yra kelių korpusų vandens motociklas, turintis du lygiagrečius, vienodo dydžio korpusus. Katamaranai būna tiek buriniai, tiek motoriniai. Paprastai katamaranai turi mažesnę korpuso tūrį, poslinkį ir grimzlę, abu korpusai dažnai turi mažesnę hidrodinaminę pasipriešinimą, todėl burėms ar varikliams reikia mažiau varomosios jėgos. [4].

Šiandien, laivo stovumo ir supimosi, eigumo ir valdomumo, bendrojo ir vietinio tvirtumo tyrimų metodai remiasi patikima informacija apie laivą veikiančias aerodinamines ir hidrodinamines jėgas. Šias jėgas sukelia vėjas ir bangos. Ypač svarbu užtikrinti geras laivo jūrines savybes, esant audringai jūrai, nes laivas veikiamas vėjo ir bangų, pasvyra, intensyviai supasi, blogėja jo valdomumas, mažėja greitis. [14].

2.1. Katamaranų supimosi problemos

Laivo supimasis, tai svyravimai pusiausvyros padėties atžvilgiu. Pagrindinė svyravimų priežastis yra jūros bangavimas. Laivas, besisupantis ant bangų, laikomas kietuoju kūnu, kuris turi šešis laisvės laipsnius. Supimosi tipai [4]:

- vertikalusis – slenkamasis svyravimas vertikalia kryptimi;
- išilginis – slenkamasis svyravimas išilgine kryptimi;
- skersinis – slenkamasis svyravimas skersine kryptimi;
- kilinis – sukamasis svyravimas apie skersinę ašį;
- bortinis – sukamasis svyravimas apie išilginę ašį;
- vingiavimas – sukamasis svyravimas apie vertikalią ašį (žr. 1 pav.).



1 pav. Laivo supimosi tipai pagal kryptis ir ašis. [14].

Vyksta 3 linijiniai svyravimai x , y , z ašių kryptimis ir 3 kampiniai svyravimai apie šias ašis. Vykstant vienam supimosi tipui gali vykti ir kitas laivo supimasis, esant bangavimui. Tai galima paaiškinti girokopiniu, hidrodinaminiu ir hidrostatiu efektu. Pagal girokopinį efektą sukantis apie vieną ašį yra sukuriamas kampinis judėjimas aplink kitą ašį. Hidrostatinis efektas, kai pasikeičia laivo hidrostatinis jėgos dydis ir veikimo centras, šie pasikeitimai sukelia vertikalų ir kilinį laivo supimąsi. [18].

Svyravimus charakterizuoja šie dydžiai [6]:

ξ – linijiniai svyravimai išilginės ašies kryptimi – horizontalusis – išilginis svyravimas;

η – linijiniai svyravimai skersinės ašies kryptimi – horizontalusis – skersinis svyravimas arba kitaip – dreifas;

ζ – linijinis svyravimas vertikaliosios ašies kryptimi – vertikalusis svyravimas arba kitaip – vertikalusis supimasis;

θ – kampinis svyravimas apie išilginę ašį – bortinis (šoninis) supimasis;

ψ – kampinis svyravimas apie skersinę ašį – kilinis supimasis;

φ – skersinis supimasis apie vertikaliąją ašį – vingiavimas.

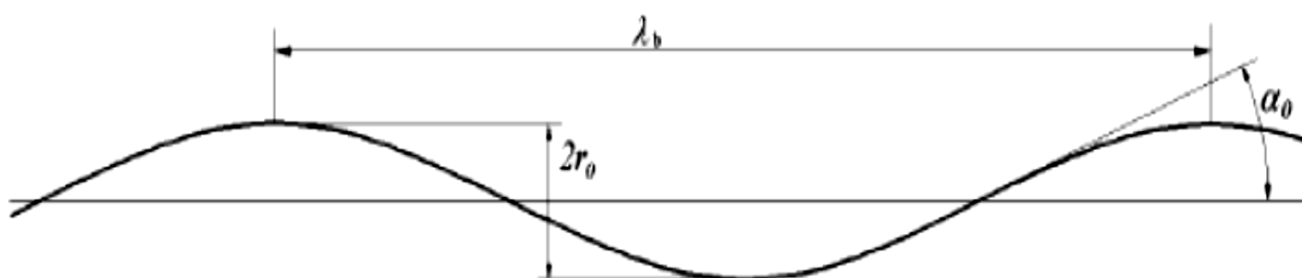
Greitaeigiai vandentalpiniai katamaranai turi siaurus pagrindinius korpusus. Dėl mažesnio korpusų pasipriešinimo šie katamaranai išvysto gerokai didesnę greitį. Kita vertus, dėl siaurų korpusų greitaeigių katamaranų išilginis supimasis yra blogesnis už vienkorpusių tokio pat ilgio laivų išilginį supimąsi. [26].

Dėl supimosi gali atsirasti įvairių pasekmių, tokių kaip [27]:

- Papildomų apkrovų veikiančių korpusą atsiradimas, kas gali sumažinti bendrą ir vietinį korpuso stiprumą. Pati sudėtingiausia ir daugiausiai apkrovų atlaikanti vieta yra tiltelis.
- Prietaisų, sistemų, įrenginių ir mechanizmų eksploatavimo sąlygų pablogėjimas. Kartais dėl šių jėgų sutrinka labai svarbių laivo mechanizmų veikla. Didžiausias sutrikimas pagrindinio variklio gedimas, dėl ko laivas gali būti išmestas į krantą ar nuskęsti.
- Valdomumo pablogėjimas. Valdymo priemonių iškilimas virš vandens.
- Propulsinių savybių sumažėjimas.
- Staigus laivo įgulos ir keleivių komforto bei gyvenimo sąlygų pablogėjimas.

Bangos ir vėjas yra pagrindinis supimosi šaltinis. Reguliarus bangavimas vyksta tada, kai, bet kuriame laiko periode bangos dažnis, amplitudė ir ilgis yra vienodi. [18].

Bangos susidaro veikiant trinties jėgoms tarp vandens paviršiaus ir oro srauto. Jei šis poveikis pastovus (vėjas negūsingas), susidaro vienodos formos ir vienodo dydžio bangos, t. y. reguliarios bangos (žr. 2 pav.). Pačios bangos mažos amplitudės. [14].



2 pav. Reguliarios bangos profilis. [5].

Reguliarios bangos parametrai [10]:

- bangos ilgis;
- periodas;
- amplitudė;
- statusas.

Bangos statusas – tai bangos ilgio ir aukščio santykis, kai šis santykis per didelis, bangos tampa aukštos lyginant su bangos ilgiu ir tuomet tokios bangos tampa nestabilios. Esant reguliariam – pastoviam bangavimui nagrinėjamas laivo supimasis. Laivo supimasis sužadintame jūros paviršiuje, susideda iš progresinių, plokščių ir su mažomis amplitudėmis bangų. [10].

Bangos charakteristikos dydžiai [5]:

- bangos aukštis – tai atstumas nuo bangos pado iki bangos viršūnės ($h_b = 2r_0$, žr. 4 pav.);
- bangos ilgis λ_b – tai atstumas tarp dviejų bangos viršūnių arba bangos padas;
- bangos periodas $\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda_b$ – tai laikotarpis tarp dviejų nuosekliai einančių bangos viršūnių;
- bangos profilio greitis $c = \frac{\lambda_b}{\tau}$ – tai atstumas per kurį laiko vienetą perkeliama bangos viršūnė;
- bangos šlaito kampas α_0 – tai kampas, kurį sudaro bangos liestinė su horizontu;
- bangos statusą charakterizuoja bangos aukščio ir ilgio santykis – $\frac{2r_0}{\lambda_b}$.

Prieš aptariant katamaranų judėjimą nusakančias paprastas formules, reikėtų paminėti, kad katamaranai nuo vienkorpusių laivų skiriasi ne vien korpusų skaičiumi, jie labai skiriasi lyginant jų matmenų santykius [5]:

- santykinis denio plotis (katamaranas $L/B = 1 \div 5$, vienkorpusio laivo $L/B = 2,5 \div 11$);
- santykinai mažesnis korpuso plotis (katamarano $B1/d = 2 \div 0,2$, didžiosios daugumos vienkorpusių laivų $B1/d = 2 \div 4$);

- o santykinai didesnis borto aukštis (katamarano $L/D = 0,1 \div 0,3$, vienkorpusio laivo $L/D = 0,05 \div 0,15$).

Kai vienkorpusio laivo ir katamarano korpusų apvadų formos ir vandentalpos ilgis yra vienodas, tai katamarano metacentrinis spindulys bei inercijos momentas skersinės ašies atžvilgiu yra nedaug mažesnis negu vienkorpusio laivo. Vertikalaus supimosi ir laisvojo kilinio dažniai yra panašūs vienas kitam, bet katamaranų supimosi dažniai neretai yra šiek tiek didesni. [39].

Išilginio supimosi sąlygomis sumažėja keleivių komfortas, plaukiama lėčiau, bangų smūginės apkrovos tampa stipresnės ir dažnesnės. Todėl išilginio supimosi tyrimas ir jo mažinimas yra vieni iš svarbiausių greitaeigių katamaranų projektavimo bei eksploatavimo uždavinių.

2.2. Linijinės laivo išilginio supimosi teorijos analizė

Išilginis laivo supimasis (vertikalusis ir kilinis) vyksta, kai bangų plitimo kryptis artima laivo diametralinei plokštumai. Tai gali būti tiek bangavimas į laivapriekį, tiek į laivagalį. Pagrindinis skirtumas tarp skersinio (bortinio ir vertikalaus supimosi bangoms plintant statmenai diametralinei plokštumai) ir išilginio (vertikalaus ir kilinio) laivo supimosi yra tas, kad laivo ilgis išilginio supimosi atveju nėra be galo mažas palyginti su bangos ilgiu. [14].

Vieno korpuso tipo laivų, taip pat ir katamaranų kilinio supimosi diferencialinės lygtys sudaromos kartu su vertikalaus supimosi lygtimis, kurios sudaro reguliariam bangavimui laivo kilinio supimosi lygčių sistemą. [37].

Diferencialinės lygtys (1 formulė) skirtos katamarano kilinio supimosi charakteristikoms apskaičiuoti, kai nežymiai skiriasi nuo analoginių lygčių, kurios aprašo vieno korpuso laivo kilinį supimąsi, o šios lygtys yra sudarytos nepaisant jungiamojo tilto įtaką supimuisi. Buvo pasirinktos laivo kilinio supimosi lygčių žymėjimo būdai, kurie bus naudojami baigiamajame darbe, tai mokslininko Remezo pasiūlyti lygties žymėjimai. [40].

Laivo supimąsi sužadinančios jėgos [40]:

$$\frac{A_j^s}{A_j^c} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} a_j \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx \quad (1)$$

$$\frac{A_j^{xs}}{A_j^{xc}} = \int_{-L/2}^{L/2} a_j x \begin{Bmatrix} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{Bmatrix} dx$$

Formulių paaiškinimas:

x – atstumas tarp laivo skaičiuojamojo skerspjuvio ir laivo svorio centro, (m);

a_j – pagrindinė sužadinamosios jėgos dedamoji;

A_j – sužadinimo jėgos integralas, taip žymima tik, jei į pointegralinę funkciją įeina a_j ;

A_j^s, A_j^c – žymima, jei į pointegralinę funkciją įeina $\sin k_1 x, \cos k_1 x$;

A_j^{xs}, A_j^{xc} – žymima, jei į pointegralinę funkciją įeina daugiklis x

Λ_{ij} – demferavimo koeficientas;

M_{ij} – prijungtųjų masių koeficientas.

Visi šie žymėjimai bus naudojami visame baigiamajame darbe.

$$\begin{cases} \frac{M_{ij}^s}{M_{ij}^c} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} k_k^0 \mu_{ij} \begin{cases} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{cases} dx \\ \frac{\Lambda_{ij}^s}{\Lambda_{ij}^c} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} k_k^0 \lambda_{ij} \begin{cases} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{cases} dx \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{M_{ij}^{xs}}{M_{ij}^{xc}} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} k_k^0 \mu_{ij} x \begin{cases} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{cases} dx \\ \frac{\Lambda_{ij}^s}{\Lambda_{ij}^c} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} k_k^0 \lambda_{ij} x \begin{cases} \sin k_1 x \\ \cos k_1 x \end{cases} dx \end{cases} \quad (3)$$

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

λ_{ij} – izoliuoto kontūro demferavimo koeficientas, turintis teorinio španhauto formą;

k_k^0 – redukavimo koeficientas.

Visų pirma, katamarano jūrines savybes pradėsime analizuoti nuo vertikalaus ir kilinio supimosi lygties, kurią pasiūlė mokslininkas Lugovskij. [41].

$$\begin{cases} a_{33}\ddot{\zeta}_g + b_{33}\dot{\zeta}_g + c_{33}\zeta_g + a_{33}\ddot{\psi} + b_{33}\dot{\psi} + c_{33}\psi = \alpha_3 \cos \sigma_k t + \beta_3 \sin \sigma_k t \\ a_{53}\ddot{\zeta}_g + b_{53}\dot{\zeta}_g + c_{53}\zeta_g + a_{53}\ddot{\psi} + b_{53}\dot{\psi} + c_{53}\psi = \alpha_5 \cos \sigma_k t + \beta_5 \sin \sigma_k t \end{cases} \quad (4)$$

Kai, $\sigma_k = \sigma_0 - kv \cos \varepsilon$ – menamasis bangos dažnis, (s^{-1});

σ_0 – ciklinis bangos dažnis, (s^{-1});

v – laivo greitis, (m/s);

ε – kampas tarp bangų sklidimo ir laivo judėjimo krypties, (laipsniais);

ζ_g – laivo svorio centro aplikatė, (m);

ψ – laivo kilinio supimosi kampas, (laipsniais);

$a_{jj}, b_{jj}, c_{jj}, (i, j = 3, 5)$ – tai supimosi dempferavimo koeficientai bei prijungtosios masės, kurių dydžiai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Prijungtųjų masių ir supimosi dempferavimo 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	$M_{35} - m x_g l_y$	$\Lambda_{35} - v M_{33}$	$-\rho g S_0 (x_c - x_g) + v \Lambda_{33}$
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, (m^3);

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

S_0 – laivo konstrukcinės vaterlinijos plotas, (m^2);

x_g – laivo svorio centro abscisė, (m);

x_c – laivo vandentalpos centro abscisė, (m);

I_y – laivo masės inercijos momentas, ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

Sekantys elementai randami pasinaudojus plokščiųjų laivo skerspjuvių hipoteze. [2].

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

$M_{35} = \int_{L/2}^{-L/2} x \mu_{33}(x) dx$ – 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 centras;

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

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

$\mu_{33}(x)$ – teorinio španhauto vertikalių svyravimų prijungtos masės koeficientas. [44].

Sužadinamosios jėgos ir momentai:

$$\alpha_3 = r_0 [\rho g A_3^c - \sigma_0 (M_{33}^c \sigma_k - \Lambda_{33}^s)] \quad (5)$$

$$\beta_3 = r_0[-\rho g A_3^S - \sigma_0(M_{33}^S \sigma_k - \Lambda_{33}^c)] \quad (6)$$

$$\alpha_5 = r_0 \left\{ -\rho g A_3^{xc} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xc} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xs} - v(M_{33}^S + \Lambda_{33}^c \sigma_k^{-1}) \right) \right\} \quad (7)$$

$$\beta_5 = r_0 \left\{ \rho g A_3^{xs} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xs} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xc} - v(M_{33}^c + \Lambda_{33}^s \sigma_k^{-1}) \right) \right\} \quad (8)$$

Surašomos pagrindinės dedamosios lygtys, kurios sudaro sužadinajamąsias jėgas:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_3^S = \int_{L/2}^{-L/2} k_3 b_1 \sin k_1 x dx \\ A_3^{xs} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3 x b_1 \sin k_1 x dx \\ A_3^c = \int_{L/2}^{-L/2} k_3 b_1 \cos k_1 x dx \\ A_3^{xc} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3 x b_1 \cos k_1 x dx \end{array} \right. \quad (9)$$

čia: $b_1 = b - k\omega_f$, kur b – španhauto plotis;

ω_f – španhauto plotas panirusio į vandenį (m^2);

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

λ_b – bangos ilgis, (m);

k_3 – redukcijos koeficientas;

x – atstumas tarp laivo svorio centro ir jo skaičiuojamojo skerspjūvio (m).

Vėliau surašomos sužadintų jėgų difrakcinės dempferavimo dedamosios:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{33}^S = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 \lambda_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^{xs} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 x \lambda_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^c = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 \lambda_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ \Lambda_{33}^{xc} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 x \lambda_{33}(x) \cos k_1 x dx \end{array} \right. \quad (10)$$

Surašomos sužadintų jėgų difrakcinės inercinės jėgos dedamosios lygtys:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{33}^s = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ M_{33}^{xs} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 x \mu_{33}(x) \sin k_1 x dx \\ M_{33}^c = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \\ M_{33}^{xc} = \int_{L/2}^{-L/2} k_3^0 x \mu_{33}(x) \cos k_1 x dx \end{array} \right. \quad (11)$$

Šios lygtys leidžia išsiaiškinti katamarano laivo supimosi pobūdį. Keičiasi dempferavimo, inercinės, sužadinamosios ir atstatomosios jėgos, dėl katamarano korpusų hidrodinaminio ryšio. Viena iš svarbių faktų yra papildanti katamarano kilinio supimosi lygtis. Ši lygtis priklauso nuo horizontalaus klirensio dydžio, o norint įvertinti horizontalaus klirensio priklausomybę nuo prijungtosios masės, įvedamas prijungtosios masės koeficientas. Šis koeficientas parodo, kiek skiriasi vieno izoliuoto korpuso prijungtoji masė nuo dviejų katamarano korpusų prijungtosios masės. [5].

Aprašius paprastas patikslintas greitaiegių katamaranų supimosi skaičiavimo metodus, toliau sprendžiami kiti susiję sprendimo būdai.

2.3. Katamaranų supimosi sprendimas

Katamaranus laivus yra kur kas sudėtingiau tyrinėti negu vieno korpuso laivus, nes yra sudėtingesnis objektas ir turi sudėtingesnę konstrukciją. Paaiškinti galima mažiau ištirtais hidrodinaminiais fenomenais, kurie pasirodo dviejų korpusų laivų supimosi metu. Norint ją aprašyti reikia išsianalizuoti [35, 36]:

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

Supimosi problemai spręsti atliekama daug eksperimentų, analizuojamos įvairios priemonės, skirtos šiai problemai mažinti. Dažnai yra naudojami stabilizavimo įrenginiai įvairaus pobūdžio, dydžio ir kainos.

Supimąsi ir jo pasekmes sumažinti galima [20]:

1. Racionaliai (supimosi požiūriu) parenkant laivų apvadus. Laivo kilinio supimosi amplitudes galima sumažinti, naudojant V formos špantus ir tiesias arba šiek tiek išgaubtas

vaterlinijas laivapriekyje. Laivapriekio užliejimą galima sumažinti, naudojant špantus su pakankamu bortų posvyriu povandeninėje dalyje. Siekiant pagerinti laivo jūrines savybes, naudojami nuožulnūs laivapriekio apvadai.

2. Išdėstant krovinius, galima šiek tiek sumažinti supimąsi, nes krovinio vietos pakeitimas laive gali tik pakeisti supimosi pobūdį.

3. Racionaliu laivo manevravimu, keičiant eigos greitį ir kurso kampą bangų atžvilgiu. Žalingą rezonansinio supimosi įtaką gyvenimo sąlygoms laive galima sumažinti tikslingai parenkant jo greitį ir kurso kampą bangų judėjimo krypties atžvilgiu. Laivų eksploatacijos patirtis rodo, kad supimosi amplitudžių sumažėjimas pastebimas tais atvejais, kai laivo nuosavų svyravimų periodas skiriasi ne mažiau kaip 30% nuo menamojo periodo.

4. Naudojant kajučių, postų, mechanizmų ir kt. vietinės stabilizacijos priemones. Siekiant užtikrinti patikimą kajučių, postų ar mechanizmų stabilizavimą, stabilizavimo priemones reikia valdyti automatiškai būdu. Apskritai supimosi slopinimo priemonės, susijusios su korpuso apvadų formos parinkimu, apkrovų išdėstymu, laivo eigos greičio ir kurso kampo bangų judėjimo atžvilgiu pakeitimu bei vietinių stabilizavimo priemonių naudojimu, yra pritaikomos tik ribotai ir yra nepakankamai efektyvios kovojant su žalingomis laivo supimosi pasekmėmis įvairiomis išorinio bangavimo sąlygomis.

5. Laivo supimosi slopinimo problemą galima išspręsti tik naudojant bendros stabilizacijos priemones. Patikimiausia ir universali priemonė kovojant su supimu – tai specialių supimosi stabilizavimo įrengimas, nes tai susieta su papildomomis išlaidomis, laivo svorio didinimu ir jo patalpų naudingojo tūrio mažinimu.

Specialios priemonės, kurios yra naudojamos laivų supimuisi slopinti, vadinamos supimosi slopintuvais. Laivo stabilizavimas suprantamas kaip kompleksinis priemonių, skirtų apriboti nepageidautinus poslinkius, naudojamas projektavimo, statybos ir net eksploataavimo procesuose. Patikslinus lygtis reguliariam bangavimui bus galima aprašyti stabilizavimo įrenginius.

2.4. Katamaranų judėjimą nusakančios patikslintosios lygtys, esant reguliariam bangavimui

Didžiausia problema dėl katamarano supimosi išryškėja, tada, kai jis yra greitaeigis, kai Frūdo skaičius didesnis nei 0,3, esant nedideliems greičiams katamaranų ir vienkorpusių laivų charakteristika išlieka panaši. Kai katamarano korpusas yra labai ilgas, tuo met gali būti, kad katamarano kilinio supimosi charakteristika bus daug blogesnė. Norint įvertinti poveikį laivo supimuisi, turi būti atlikta katamarano korpuso sąveikos įtaka ir korpuso sąveikos tarpusavyje, taigi tam atlikti panaudojamas L. Sedovo skaičiavimo būdas. Norint nustatyti klirseno poveikį laivo

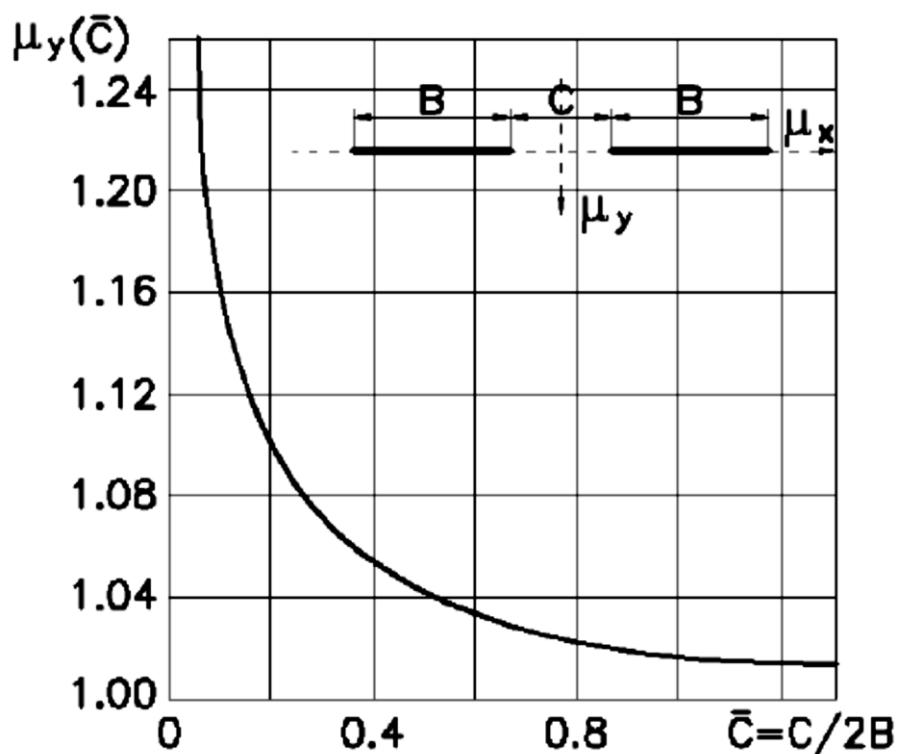
supimuisi, tai šis būdas, kuris yra apie necirkuliarinį dviejų plokštelių tandemų judėjimą ant nesvaraus skysčio paviršiaus, leidžia įvertinti.

Naudojant šį metodą laivas yra pakeičiamas plokštelių pora, kai juda neramaus vandens skysčio viršumi. Iš vienos plokštelės dvigubos prijungtosios masės ir dviejų plokštelių prijungtosios masės, šio santykio gaunamas koeficientas, nustatantis klirenso įtaką plokštelių tandemų prijungtajai masei [43]:

$$\mu_y = (1 + 2\bar{C})^2 \left[1 - 2 \frac{E(k)}{F(k)} \right] \quad (12)$$

Horizontalus katamarano klirensas priklauso nuo prijungtos masės koeficiento reikšmės, kuri galima nustatyti iš grafiko (žr. 3 pav.). Šio koeficiento pagalba įvertinama, kiek skiriasi vieno izoliuoto korpuso prijungtoji masė nuo dviejų katamarano korpusų prijungtosios masės.

Disertacijoje V. Djačkov panaudojo prijungtosios masės koeficientus, į kuriuos buvo įtraukta katamarano laivo supimosi lygtis ir santykinio horizontalaus klirenso priklausomybės grafikus (žr. 3 pav.).



3 pav. Horizontalaus katamarano klirenso nuo prijungtosios masės koeficiento priklausomybė. [6].

- $M_{33} = \mu_y(\bar{C}) \int_{L/2}^{-L/2} \mu_{33}(x) dx$ – prijungtosios vandens masės, esant vertikaliam supimuisi;
- $M_{35} = \mu_y(\bar{C}) \int_{L/2}^{-L/2} x \mu_{33}(x) dx$ – prijungtosios masės statinis momentas, skersinės svorio centro ašies atžvilgiu;

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

Įtraukus koeficientą $\mu_y(\bar{C})$ buvo patikslinti katamaranų supimosi lygčių komponentai.

Katamaranų judėjimą nusakančios patikslintosios lygtys, esant reguliariam bangavimui atrodys:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + M_{33})\ddot{\xi}_g + \Lambda_{33}\dot{\xi}_g + \rho g S_0 \xi_g + (M_{35} - m x_g)\ddot{\psi} + (\Lambda_{35} + v M_{33})\dot{\psi} + (-\rho g S_0 x_f + v \Lambda_{33})\psi \\ = r_0(\rho g A_3^c - \sigma_0(M_{33}^c \sigma_k - \Lambda_{33}^s)) \cos \sigma_k t + r_0(-\rho s A_3^s + \sigma_0(M_{33}^s \sigma_k + \Lambda_{33}^c)) \sin \sigma_k t \\ (M_{35} - m x_g)\ddot{\xi}_g + (\Lambda_{35} - v M_{33})\dot{\xi}_g + (-\rho g S_0 x_f - v \Lambda_{33})\xi_g + (I_y + M_{55})\ddot{\psi} + \\ \left(\Lambda_{55} + \frac{v^2}{\sigma_0^2} \Lambda_{33} \right) \dot{\psi} + (\rho g I_y - v^2 M_{33})\psi = r_0 \left(-\rho g A_3^{xc} + \sigma_0 \left(M_{33}^{xc} \sigma_k - \Lambda_{33}^{xs} - \left(M_{33}^s + \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \right) \cos \sigma_k t + \\ r_0 \left(-\rho s A_{33}^{xs} - \sigma_0 (M_{33}^{xs} \sigma_k + \Lambda_{33}^{xc}) - \left(M_{33}^c - \frac{\Lambda_{33}^s}{\sigma_k} \right) \right) \sin \sigma_k t, \end{array} \right. \quad (13)$$

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

M_{33} – prijungtos vandens masės, esant vertikaliam supimuisi;

M_{35} – prijungtos vandens masės inercijos momentas, skersinės svorio centro ašies atžvilgiu;

M_{55} – prijungtos vandens masės inercijos momentas.

Patikslintos lygtys, į kurias disertacijos autoriaus įtrauktos greitaieigiškumo pataisos leis tiksliau išspręsti išilginio supimosi uždavinius, kai Frūdo skaičius $Fr > 0,3$.

Kad turėtų įtakos negreitaiegių katamaranų supimosi charakteristikoms, tai pataisos bus per mažos, esant mažiems eigos greičiams ir tik esant $Fr > 0,3$, pataisos dydžiai reikšmingai didėja, tuo įvertindami katamarano greitaieigiškumo faktorių. [6].

2.4.1. Stabilizavimo įrenginiai

Stabilizavimo priemonių yra įvairių, tačiau kiekviena priemonė turi savo kainą ir ją įdiegti reikalinga tam tikra vieta.

Laivo supimosi mažinimo mechanizmai gali būti [20]:

- Giroskopiniai – giroskopinio mechanizmo panaudojimas laivo korpuse. Sistemą sudaro specialus giroskopas – korpuso dugne sumontuotas apie 80 kg sveriantis plieno ir aliuminio strypas (strypo dydis priklauso nuo laivo dydžio, šiuo atveju kalbame apie jachtas), kurį suka elektrinis motoras. Jūrai pradėjus banguoti, giroskopas įsukamas prieš posvyrio kryptį ir taip inercinių jėgų pagalba giroskopinis mechanizmas subalansuoja laivo korpusą horizontalioje padėtyje, laivas išlaikomas daug stabilesnėje pozicijoje. Tačiau tokie prietaisai yra labai

brangūs, o efektyvumas didesnis mažesniems laivams, tokiems kaip jachtoms, kateriams ir pan.

- Gravitaciniai – tai tokie prietaisai – skystis arba kietas kūnas, kurie įrengti pačiame korpuso viduje ir galintys jame laisvai judėti. Šie įrenginiai keičia gravitacijos taško koordinatės laivui supantis į priešingą pusę. Šie prietaisai nėra populiarūs, nes jų trūkumas, kad šie prietaisai užima nemažai vietos laivo korpuse.
- Hidrodinaminiai – tai įvairūs povandeniniai sparnai, jie yra populiariausi, nes visai neužima vietos korpuso viduje ir nėra tokie brangūs, taip pat turi platesnes panaudojimo galimybes ir yra patikimi.

Iš visų išvardintų slopintuvų rūšių, dažniausiai naudojami hidrodinaminiai stabilizatoriai, dėl prieinamos kainos ir nesudėtingo pritaikymo prie laivo korpuso.

Šiame darbe bus analizuojami povandeninių sparnų pritaikymas kiliniam ir vertikaliai supimuisi mažinti, nors povandeniniai sparnai gali būti naudojami tiek išilginiam, tiek bortinio supimosi mažinimui.

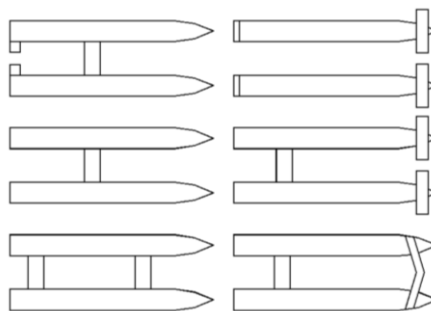
Slopintuvo – povandeninio sparno efektyvumas priklauso nuo daugelio aplinkybių [1]:

- povandeninio sparno matmenų;
- povandeninio sparno formos;
- povandeninio sparno tipo;
- povandeninio sparno tvirtinimo vietos;
- laivo korpuso matmenų;
- laivo greičio;
- bangavimo intensyvumo;
- bangavimo amplitudės ir kt.

Reikėtų nepamiršti, kad kuo sparno plotas bus didesnis, tuo didesnė slėgio jėga veiks į sparno paviršių. O slopintuvo efektyvumas priklausys nuo povandeninio sparno tvirtinimo vietos, matmenų, formos, katamarano korpuso matmenų tipo, greičio, amplitudės, bangavimo intensyvumo ir t.t. Povandeninis sparnas tvirtinamas standžiai tarp katamarano korpusų, nes sukelia vibracijas. Taip pat į sparno paviršių veikia didesnė slėgio jėga, kai kuo didesnis sparno plotas. Mažinant sparną mažėja vibracijos ir mažėja sparno efektyvumas, dėl to reikia reguliuoti parametrus. Geriausiai yra standus tvirtinimas, kuris leidžia didinti katamarano povandeninio sparno plotą ir sumažina vibracijų įtaką, kuri būna labai nežymi arba jos išvis nėra. [3].

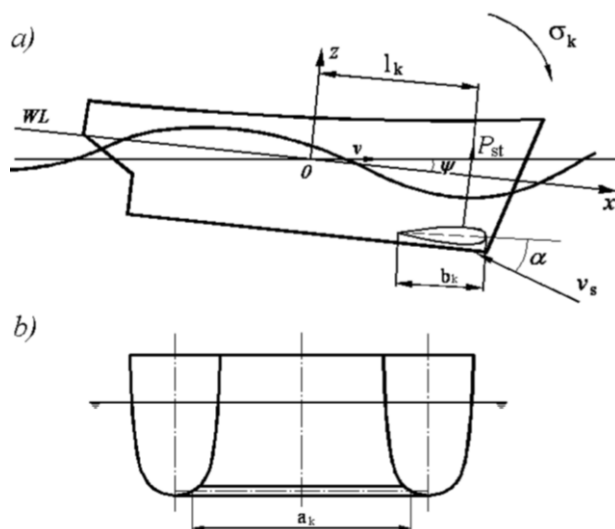
Povandeniniai sparnai gali būti pasyvūs ir aktyvūs. Pasyvūs yra stacionariai pritvirtinti prie korpuso, o aktyvūs nuo pasyvių skiriasi tuom, kad aktyviuose sparnuose yra valdomas jų posvyrio

kampas. Katamaranas gali turėti sparnus tiek laivagalyje tiek ir laivapriekyje. Pateikiami sparnų tvirtinimo schemas (žr. 4 pav.):



4 pav. Greitaeigių katamaranų povandeninių sparnų schemas. [5].

Katamaranas turi du korpusus, taigi tarp jų galima įrengti laivapriekio povandeninį sparną – kilinio ir vertikalaus supimosi slopintuvą. Katamaranui plaukiant bangavimo metu greičiu v , atsiranda kilinis supimasis, kuris apibūdinamas diferento kampo ψ dydžiu ir kampiniu laivo sukimosi aplink svorio centrą greičiu σ_k .



5 pav. Katamarano povandeninio sparno tvirtinimo schema: a) iš šono, b) iš priekio. [5].

Jeigu katamarano laivapriekyje tarp korpusų yra įrengtas povandeninis sparnas, tai veikiant laivo kampiniams poslinkiams ir eigos greičiui v , sparną veiks vandens srautas greičiu v_s , esant atakos kampui α prie vidurinės sparno linijos. [5].

Reikia pabrėžti, kad povandeninius sparnus galima įrengti ir vienkorpuseriuose laivuose, tačiau šiuo atveju sparnas turės laisvas gembes, dėl to vibruos pats sparnas ir laivapriekis. Norint išvengti vibracijos, sparno plotas turi būti nedidelis, tačiau dėl to jis bus ne toks efektyvus, išsikišusios dalys trukdys švartuoti laivą ir t. t. [45]. Parinkta stabilizavimo priemonė, šiuo atveju stabilizavimo sparnas, turi atitikti keliamus reikalavimus ir turi veikti efektyviai – mažinti kilinį supimąsi, kitu atveju, tai bus tik papildomos išlaidos laivo savininkui. Šiame darbe paskaičiuosime su „Excel“ ir „FLOW – 3D“ programinėmis įrangomis, atliksime tyrimus ir tarpusavyje palyginsime.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Skaičiuojant katamarano laivo vertikalaus ir kilinio supimosi charakteristikas, naudojamos dvi kompiuterinės programos, tai „*Excel*“ ir „*FLOW – 3D*“, pirmoji programa sudaryta naudojantis Djačkov V. sudarytu skaičiavimo algoritmu programoje, sudedamosiomis hidrodinaminėmis jėgomis, kurios veikia laivą, apskaičiuojant pagal skerspjuvių hipotezę. [2].

Atliekant skaičiavimus sudaroma skaičiavimų užduotis [21]:

1. Surašoma laivo charakteristika:

- nustatomas laivo tipas (vienkorpusis ar katamaranas),
- parenkama ar laivas yra su supimosi stabilizatoriais ar be (nustatyti stabilizatorių tipą bei jų išdėstymo schemą),
- papildomi laivo duomenys: španhautų skerspjuvių plotis, jų grimzlė, plotas, paties laivo korpuso ilgis, plotis, grimzlė, greitaeigiškumas, borto aukštis ir t.t.

2. Surašomos sąlygos, kuriomis laivas dirbs:

- surašome bangų ilgius,
- sudarome supimosi parametrų ir laivo poslinkių parametrų grafikus.

Programoje sukuriama denio užliejamumo bei amplitudinių – dažninių charakteristikų grafikai. Minėtiems grafikams sudaryti reikia įvesti vieno katamarano korpuso skerspjuvių koordinates.

3.1. Tiriamojo objekto – Klaipėdos universiteto mokslinio tyrimų laivo „*Mintis*“ aprašymas

KU mokslinių tyrimų laivas „*Mintis*“ yra specialios paskirties daugiafunkcinis jūrinių tyrimų laivas. Kuris atlieka visus pagrindinius okeanografinius, ekologinius, geologinius ir biologinius fizikinius – cheminius tyrimus Baltijos jūroje ir kituose vandenyse. Laivas yra skirtas moksliniams tyrimams, taip pat įvairiems jūrinio sektoriaus veiklų poreikiams tenkinti, tai tyrimus susijusius su žuvų ištekliais, jūrinės aplinkos monitoringu, palaidoto cheminio ginklo rajonų taršos monitoringu ir taip pat turi reaguoti į taršos incidentus ir t.t. [48].

Laive yra įrengtos dvi laboratorijos, kuriuose galima atlikti geologinius, biologinius ir fizikinius bei cheminius tyrimams. Laive yra daug mokslinių įrenginių, tokių, kaip įvairūs sensoriai, filmavimo kameros, sonarai, akustiniai matuokliai, pozicionavimo sistemos, gaudyklės, echolotai ir t.t. [49].

Klaipėdoje 2014 m. „Vakarų Baltijos laivų statykloje“ pastatytas „Mintis“ laivas (žr. 6 pav.). Laivo įgulą sudaro šeši nariai, o į mokslines ekspedicijas gali plaukti dvylika mokslininkų. [47].



6 pav. KU mokslinių tyrimų laivas „Mintis“. [47].

Tyrimų laivas atlieka ne tik tyrimus, „Mintis“ yra daugiafunkcinis laivas. KU mokslinių tyrimų laivas atlieka šias funkcijas [46]:

- vandens baseinų dugno mėginių paėmimą;
- įvykių vietos apžiūrą;
- grėžinių kabotažą;
- naudingų iškasenų jūroje ir kranto zonoje paieškas;
- žemės gelmių tyrimus;
- vandens storumės monitoringą;
- vandens baseinų gylių matavimus;
- dugno morfologijos nustatymus;
- dugno paviršiaus inventorizaciją;
- nuskendusius objektų identifikavimą ir apskaitą;
- seismo – akustinius jūros dugno tyrimus;

- gruntų stipruminių savybių tyrimus;
- geodezinius matavimus, reljefo matavimus.

Laivo „*Mintis*“ grimzlė yra ganėtinai maža, taip užtikrinama, kad specialūs tyrimai būtų atliekami ne tik atviroje jūroje, bet ir uosto akvatorijose, pakrantėse, mariose bei didesnių upių žiotyse. Laivas yra labai manevringas ir ekonomiškas. Laivo techniniai duomenys pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Pagrindiniai laivo techniniai duomenys [22]

Pavadinimas	Reikšmė
Laivo tipas	Katamaranas
Ledo klasė	ICE - 1C
Bendras laivo tonažas	499 GT
Laivo dedveitas	Apie 100 t
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 metu)	2,80 m
Plaukiojimo autonomiškumas	21 diena
Plaukiojimo nuotolis	2500 jūrmylės
Maksimalus laivo greitis	12,50 mazgų
Ekonominis laivo greitis	11,50 mazgų
Bendra pagrindinių variklių galia	2000 kW
Įgulos skaičius laive	6 asmenys
Mokslinio personalo skaičius laive	Iki 12 asmenų

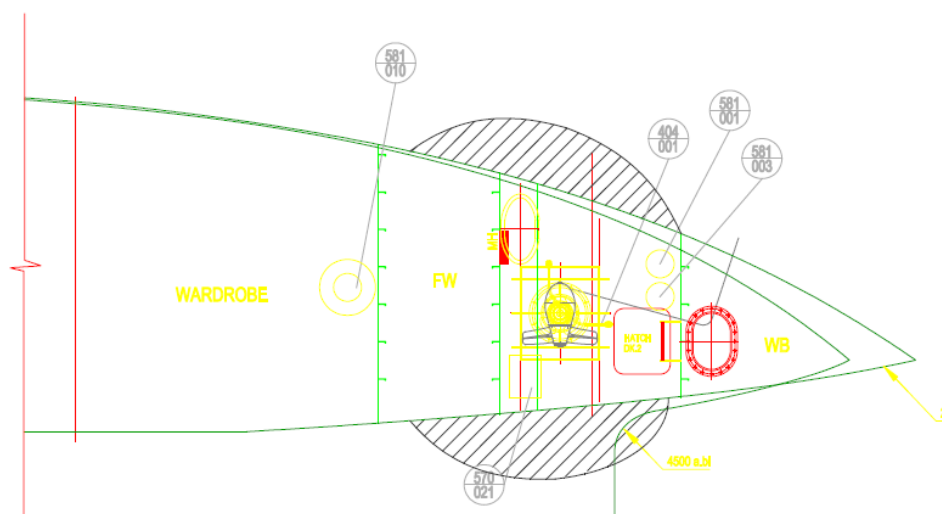
Pagrindiniai laivo matmenys: laivo ilgis 38,7 metrai, plotis 12 metrų, borto aukštis – 4,5 metrai ir grimzlė – 2,8 metrai.

Laivo plaukimo nuotolis 2500 jūrmilyų, o maksimalus greitis 12,50 mazgų. Šis katamaranas, tai tyrimų laboratorija ant vandens, kuriame yra labai galinga jėgainė ir pati naujausia mokslinė įranga, taip pat ir navigacijos sistema. Šio laivo statybos išbandymas yra tai, kad jame sumontuota labai daug įrangos, o laivas savo gabaritais nėra didelis [48].

Šiame darbe suprojektuosime sparnus katamaranui ir atliksime tyrimą, išsiaiškinsime ar povandeninis sparnas pagerina katamarano jūrines savybes.

3.2. Stabilizuojančio sparno projektavimas

Atsižvelgiant į Žemaitytės A. darbe projektuotą sparnų formą (žr. 7 pav.) į jų sudarymo principus ir bendrą plotą sudarysime savo sparnų formą ir nustatysime jų išdėstymo vietą.

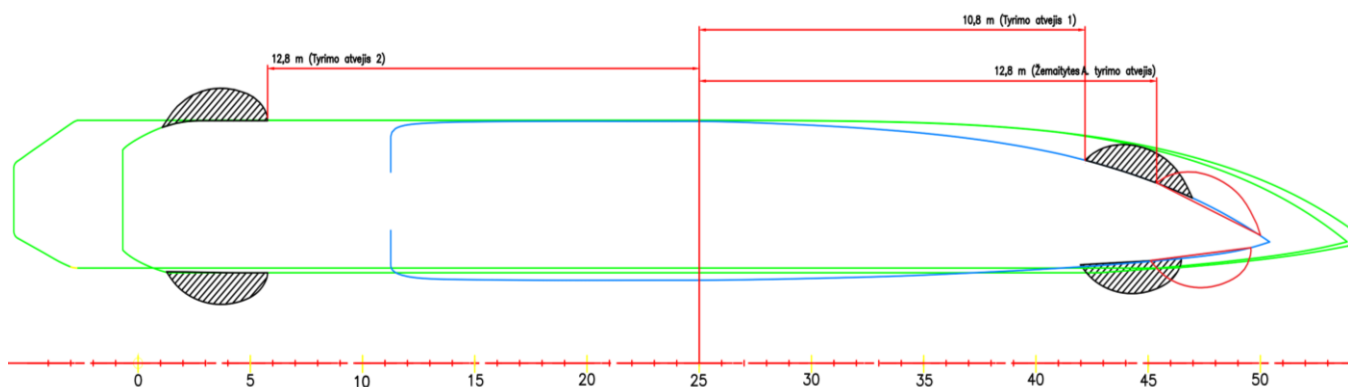


7 pav. Žemaitytės A. darbe tiriamų sparnų eskizas. [22].

Žemaitytės A. darbe tiriamų sparnų eskizas, kuris buvo apskaičiuotas 4 projektuojamų sparnų projekcijų į plokščiąją dalį plotas, [m²], tai gauta 6 m².

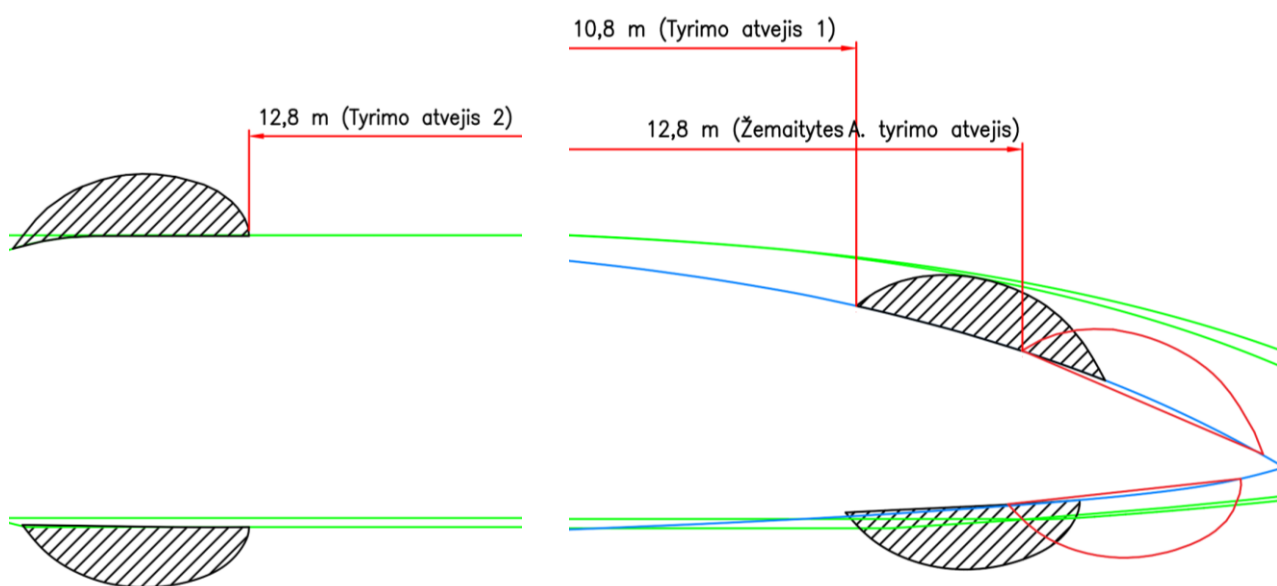
Esant didelėms sparno apkrovoms, būtų idealu suprojektuoti kuo patvaresnį stabilizuojantį sparną. Pagrindinis tikslas sukurti kuo plonesnį sparną, kadangi kuo plonesnis sparnas – tuo mažesnis pasipriešinimas horizontalia judėjimo kryptimi, kad turėtų kuo mažesnę vandens pasipriešinimo įtaką laivo judėjimui.

Šiame darbe naudosime 8 pusmėnulio formos sparnus laivapriekinėje ir laivagalinėje korpuso dalyje (žr. 8 ir 9 pav.).



8 pav. „Mintis“ laivo projektuojamo vieno korpuso dalis su sparnais (eskizas)

Sparnų padėtis projektuojama „AutoCAD 2020“ programine įranga, ant vieno korpuso, nes šiuo metu įtakos antras korpusas neturi. Projektuojamo sparno storis 50 cm.



9 pav. Projektuojamų sparnų eskizas (laivagalinių ir laivapriekinių).

Išanalizavus stabilizavimo priemones ir esamus laivo svyravimus, darbo tikslas – katamarano „Mintis“ stabilizavimo priemonės – sparnų pozicijos būtų pastumta į laivagalį 2 metrus nuo Žemaitytės A. projektuoto sparno ir laivagalinių sparnų pozicija pastumta -12,8 metrus nuo midelio.

3.3. Laivų išilginio supimosi kompiuterinė programa

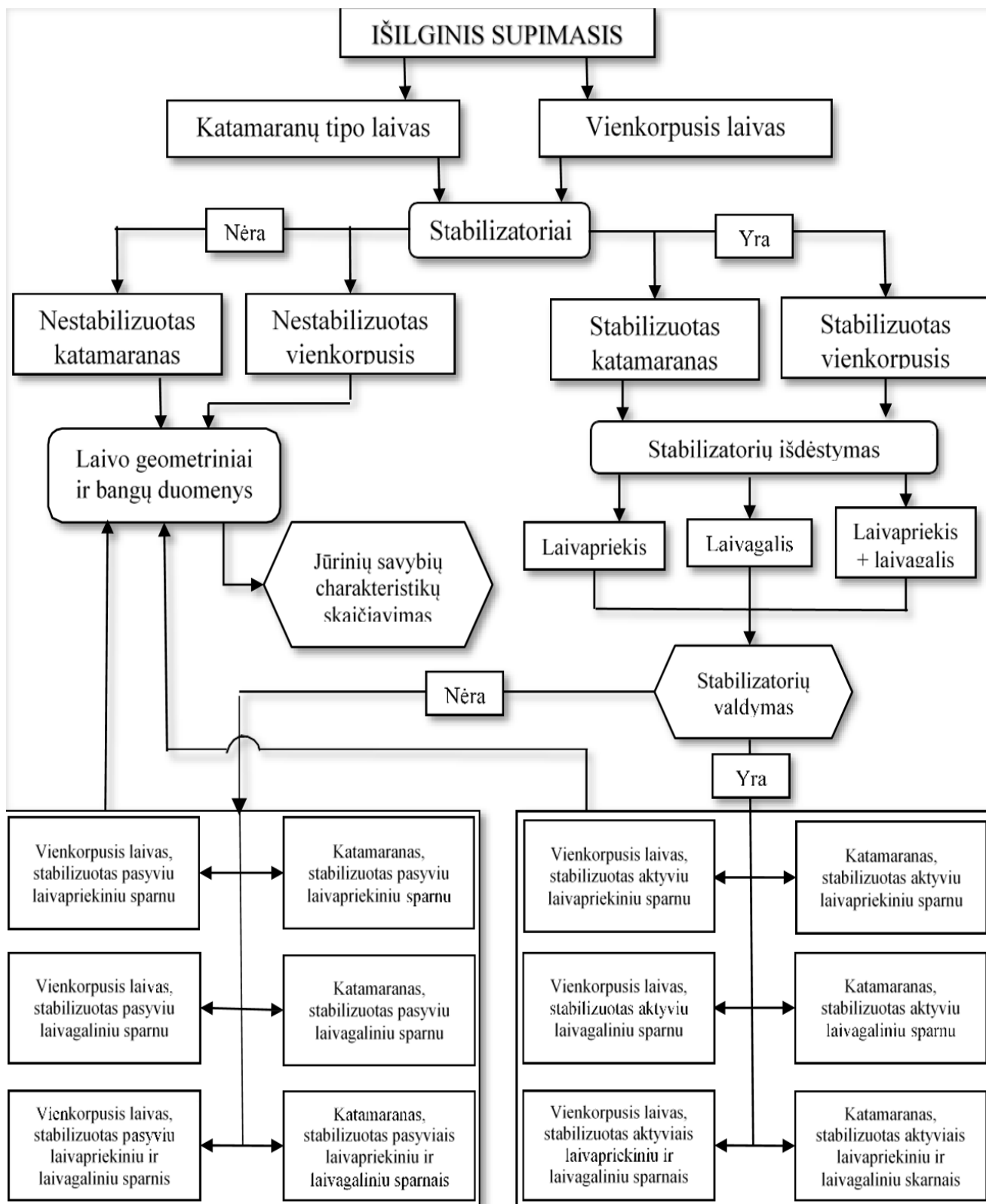
Naudojant patikslintas išilginio supimosi lygtis buvo sudaryta kompiuterinė programa, kuri suteikia galimybę apskaičiuoti tiek katamaranų, tiek vienkorpusių laivų išilginio supimosi charakteristikas. Skaičiuojant išilginį supimąsi programa geba įvertinti ir prie laivo esančius supimosi stabilizavimo įrenginius.

Ši kompiuterinė programa sukurta *Microsoft Office Excel* programos pagrindu su papildomais moduliais, kuriuos sudarė *Visual Basic for Applications*. Programa skaičiavimus atlieka linijinės laivo supimosi teorijos pagrindais. [5].

„Excel“ programoje sudedamosios hidrodinaminės jėgos, apskaičiuojamos pagal skerspjūvių hipotezę, kurios veikia laivą. [2]. Kad skaičiavimai būtų kuo tikslesni, į programą įtraukta prijungtųjų masių ir supimosi dempfiravimo koeficientai, redukciniai koeficientai bei greitaeigiškumo faktoriai. [16]. Skaičiavimai atliekami į *Excel* failą suvestų formulių pagalba, o visi gaunami rezultatai pateikiami lentelėse bei grafikuose.

Skaičiuojant katamarano išilginio ir vertikalaus supimosi charakteristikas, buvo naudotasi kompiuterine programa, kuri buvo sudaryta patikslintomis lygtimis, kurias aptarėme 2.2. skyriuje ir

skaičiavimo algoritmu (žr. 10 pav.). Šia programa bus įvertintas išilginis ir kilinis laivo supimasis su supimosi stabilizatoriumi – priekiniu ir galiniu povandeniniu sparnu.



10 pav. Kompiuterinės programos visų galimų atlikti skaičiavimų algoritmas. [20].

Atliekant skaičiavimus reikia nustatyti laivo tipą, sudaryti skaičiavimo užduotį, taip pat pasirinkti ar laive įrengti sparnai ir jiems esant įvesti jų poziciją. Taip pat reikia užduoti laivo

skerspjūvių geometrines charakteristikas: plotis, plotas ir grimzlė. Skaičiuojamojo laivo pagrindinius duomenis, tokius kaip: korpuso ilgis, plotis, grimzlė, borto aukštis, greitaeigiškumas ir kiti. [21].

Atliekant skaičiavimus reikia įvesti bangų ilgius, pagal kuriuos bus skaičiuojamos katamarano vertikalaus ir kilinio supimosi amplitudinės – dažninės ir fazinės – dažninės charakteristikos. Taip pat sudaromi, supimosi parametrų ir laivo poslinkių parametrų grafikai. [20].

Papildomi programos moduliai, kurie parašyti *Visual Basic for Applications*, yra skirti atlikti operacijas, kurių neįmanoma atlikti vien tik programos *Microsoft Excel* pagalba. Vienas iš programos modulių skirtas interpoliacijai atlikti, kiti moduliai atlieka duomenų kopijavimo funkcijas. [5].

Atliekant skaičiavimus su bangos ilgiu, kiekvieno skaičiavimo rezultatai kopijuojami iš darbinio programos lauko į rezultatų išvedimo lauką. Iš šių laukų imami duomenys grafikams sudaryti.

Norint, kad programa nubraižytų amplitudines – dažnines charakteristikas yra būtina nustatyti bangų ilgio reikšmę, pagal kurią bus atliekamas amplitudinių supimosi reikšmių skaičiavimai.

3.3.1. KU mokslinio – tiriamojo laivo supimosi skaičiavimai naudojant laivų išilginio supimosi kompiuterinę programą

Laivo „Mintis įrengtų stabilizavimo priemonių įvertinimui pagal linijinę supimosi teoriją bus naudojama skaičiavimo metodo autoriaus ir [5] sudaryta programa aprašyta 3.3. skyriuje. Norint atlikti tolimesnius skaičiavimus reikia sudaryti užduotį:

- nustatyti jūrines sąlygas;
- surašyti katamarano techninius parametrus;
- parinkti laivo tipą;
- nustatyti laivo stabilizatorius;
- aprašyti stabilizatorius (išdėstymo schemą, matmenis ir pan.).

Pirmiausia, surašomos tiriamojo laivo pagrindinės charakteristikos (žr. 3 lentelę).

3 lentelė. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos

Laivo charakteristikos		
Laivo ilgis	L, m	38,64
Katamarano vieno korpuso plotis (ties mideliu)	B, m	3,975
Laivo grimzlė	d, m	3
Tūrinė vandentalpa	V, m ³	316,81
Masinė vandentalpa	M, t	324,73
Svorinė vandentalpa	D, kN	3185,60
Laivo svorio centro aplikatė	Zg, m	5
Laivo svorio centro abscisė	Xg, m	-0,09
Laivo vandentalpos centro aplikatė	Zc, m	1,634
Laivo vandentalpos centro abscisė	Xc, m	-0,349

3 lentelės tęsinys. Pagrindinės tiriamojo laivo charakteristikos

Vaterlinijos centro atstumas nuo midelio	X_f, m	1,314
Vaterlinijos pilnumo koeficientas	α	0,5431
Vandentalpos pilnumo koeficientas	δ	0,771
Laivo konstrukcinės vaterlinijos plotas	S_o, m^2	125,64
Laivo masės inercijos momentas	I_y, tm^2	29239,50
Laivo greitis	$v_s, mazg.$	8
Laivo greitis	$v, m/s$	4,12
Frūdo skaičius	Fr	0,212
Laivo ilgio ir pločio santykis	L/B	9,72
Išilginis metacentrinis spindulys	R, m	22,97
Horizontalus klirensas	C, m	4,05
Santykinis horizontalus klirensas	$c = C/2B$	0,51

Įvedama, kad laivo ilgis yra 38, 64 m, o plotis ties mideliu 3,96 m. Laivo tūrinė vandentalpa 316,81 m³, masinė vandentalpa 324,73 tonų. Suvedami vaterlinijos ir vandentalpos pilnumo koeficientai, taip pat inercijos momentai ir, kad laivo greitis siekia 8 mazgus.

Toliau „Excel“ faile nustatomi laivo ir supimosi sparnų parametrai (žr. 4 lentelę).

4 lentelė. Laivo ir supimosi sparnų parametų nustatymas

	Konstantos	
Laisvo kritimo pagreitis	$g, m/s^2$	9,81
Vandens tankis	$\rho, t/m^3$	1,025
	Požymiai	
2 – katamaranas	Korpusas	2
1 – su sparnais	Supimosi sparnai	1
1 – laivapriekiniai sparnai	Laivapriekis - laivagalys	1

Nustatymuose įvedama, kad yra 2 – katamarano tipo laivas, 1 – laivapriekyje slopintuvas – sparnas, 1 – nevaldomas.

Skaičiuojant laivo hidrodinaminių jėgų dedamąsias suvedame kitus laivo duomenis: španhautų skerspjūvių plotus, pločius ir grimzlę ir taip apskaičiuojami kiti laivo duomenys (žr. 5 ir 6 lenteles).

5 lentelė. Španhautų charakteristikos

Charakteristika	Španhauto numeris										
	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
x, m	-19,32	-15,456	-11,592	-7,728	-3,864	0	3,864	7,728	11,592	15,456	19,32
x ² , m ²	373,26	238,88794	134,37446	59,721984	14,930496	0	14,930496	59,721984	134,374464	238,887936	373,26
b=2y _i , m	2,16	3,734	3,968	3,975	3,975	3,975	3,975	3,781	3,279	2,251	0,001
b ² , m ²	4,7	13,9	15,7	15,8	15,8	15,8	15,8	14,3	10,8	5,1	0,0
T, m	0,814	1,148	3	3	3	3	3	3	3	2,939	0,001
w, m ²	1,0606	4,113	9,08852	11,1401	11,5043	11,5018	11,3449	10,6935	8,9709	4,9766	0
b	0,603	0,959	0,763	0,934	0,965	0,965	0,951	0,943	0,912	0,752	0,500
2T/b	0,7537037	0,6148902	1,5120968	1,509434	1,509434	1,509434	1,509433962	1,58688178	1,82982617	2,611283874	2
nT menamas dažnis	0,7718241	1,0885185	2	2	2	2	2	2	2	2	0,00094819
nT realus dažnis	0,2557256	0,3606548	0,9424778	0,9424778	0,9424778	0,9424778	0,942477796	0,9424778	0,9424778	0,923314081	0,00031416
n _s	1	4	2	4	2	4	2	4	2	4	1
m ₃₃ (x), T/M	1,13	5,39	4,23	7,13	7,76	7,76	7,48	6,76	4,78	0,88	0,00
n _s *m ₃₃ (x), T/m	1,1264897	21,563784	8,4646855	28,530254	15,519299	31,021233	14,9668115	27,0216029	9,55101588	3,537208182	5,8324E-07
x*n _s *m ₃₃ (x), T	-21,76378	-333,2898	-98,122634	-220,48181	-59,96657	0	57,83175964	208,822947	110,715376	54,67108967	1,1268E-05
x ² *n _s *m ₃₃ (x), Tm	420,47626	5151,3278	1137,4376	1703,8834	231,71082	0	223,4619193	1613,78374	1283,41264	844,9963619	0,0002177
l ₃₃ (x), kN s/m ²	15,21	9,85	11,30	2,91	2,25	2,26	2,53	2,53	2,49	4,14	0,00
n _s *l ₃₃ (x), kN c/M ²	15,209414	39,418721	22,592403	11,659923	4,5076266	9,0321607	5,055787084	10,118658	4,97814835	16,57704378	1,0399E-05
x*n _s *l ₃₃ (x), kN c/m	-293,8459	-609,2558	-261,89114	-90,107884	-17,417469	0	19,53556129	78,1969891	57,7066957	256,2147886	0,00020092
x ² *n _s *l ₃₃ (x), kN s	5677,1026	9416,6569	3035,8421	696,35373	67,3011	0	75,48540884	604,306332	668,936016	3960,055773	0,00388169
kT	0,2557256	0,3606548	0,9424778	0,9424778	0,9424778	0,9424778	0,942477796	0,9424778	0,9424778	0,923314081	0,00031416
H _E	1,626E-16	1,992E-16	8,102E-17	8,117E-17	8,117E-17	8,117E-17	8,11661E-17	7,7205E-17	6,6954E-17	4,69175E-17	6,1257E-17
k ₂	0,9047439	0,8665393	0,7039872	0,7039872	0,7039872	0,7039872	0,703987234	0,70398723	0,70398723	0,708615957	0,99988689

6 lentelė. Španhautų charakteristikos

Charakteristika	Španhautu numeris										
	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
k_3	0,8504025	0,7900768	0,5123802	0,5123802	0,5123802	0,5123802	0,512380233	0,51238023	0,51238023	0,520063527	0,99982092
k_6	0,8347395	0,768075	0,4584251	0,4584251	0,4584251	0,4584251	0,458425129	0,45842513	0,45842513	0,46664936	0,99980207
k^0_3	0,8347395	0,768075	0,4584251	0,4584251	0,4584251	0,4584251	0,458425129	0,45842513	0,45842513	0,46664936	0,99980207
$\sin(k_{1x})$	-0,212007	-0,989756	-0,4795498	0,654688	0,9369896	0	-0,936989642	-0,654688	0,47954976	0,989756307	0,21200711
$\cos(k_{1x})$	0,9772681	0,1427671	-0,8775147	-0,7558992	0,3493571	1	0,34935714	-0,7558992	-0,8775147	0,142767131	0,97726812
A^s_3	-0,329387	-7,640035	-0,5475465	0,6400486	0,3482127	0	-0,396271733	-0,5679034	0,22710524	1,41726959	0,00021197
A^c_3	1,5183436	1,1020347	-1,0019401	-0,7389966	0,1298313	0,7448672	0,147750149	-0,6556982	-0,4155735	0,204433669	0,00097709
A^{xs}_3	6,3637613	118,08438	6,3471594	-4,9462959	-1,3454938	0	-1,531193977	-4,3887578	2,63260393	21,90531879	0,00409524
A^{xc}_3	-29,3344	-17,03305	11,614489	5,7109657	-0,5016682	0	0,570906577	-5,0672354	-4,8173283	3,159726793	0,01887744
M^s_{33}	-0,199356	-16,39294	-1,8608566	8,5626554	6,6661533	0	-6,428838191	-8,1098708	2,09967297	1,633727327	1,2363E-07
M^c_{33}	0,9189501	2,3645953	-3,4051295	-9,8863944	2,4854792	14,220913	2,396996111	-9,3636117	-3,8421329	0,235656557	5,6987E-07
L^s_{33}	-2,691621	-29,96639	-4,966661	3,4994396	1,9362041	0	-2,17166075	-3,0368668	1,09438448	7,656425075	2,2043E-06
L^c_{33}	12,407297	4,3224938	-9,0883542	-4,0404335	0,7219148	4,1405695	0,809704991	-3,5063495	-2,0025836	1,104398967	1,0161E-05
M^{xs}_{33}	3,8515518	253,36929	21,57105	-66,172201	-25,758016	0	-24,84103077	-62,673081	24,3394091	25,25088957	2,3885E-06
M^{xc}_{33}	-17,75412	-36,54718	39,472262	76,402056	-9,6038915	0	9,261992972	-72,361991	-44,538004	3,642307747	1,101E-05
L^{xs}_{33}	52,002114	463,16052	57,573535	-27,043669	-7,4814926	0	-8,391297139	-23,468907	12,6861049	118,337706	4,2587E-05
L^{xc}_{33}	-239,709	-66,80846	105,3522	31,22447	-2,7894789	0	3,128700087	-27,097069	-23,213949	17,06959044	0,00019631

Darbinėje „Excel“ programoje automatiškai apskaičiuojami laivą veikiančių hidrodinaminių jėgų koeficientai ir laivo kilinio ir vertikalaus supimosi lygčių sistemai spręsti reikalingi koeficientai bei skaičiavimo rezultatai (žr. 7 lentelę).

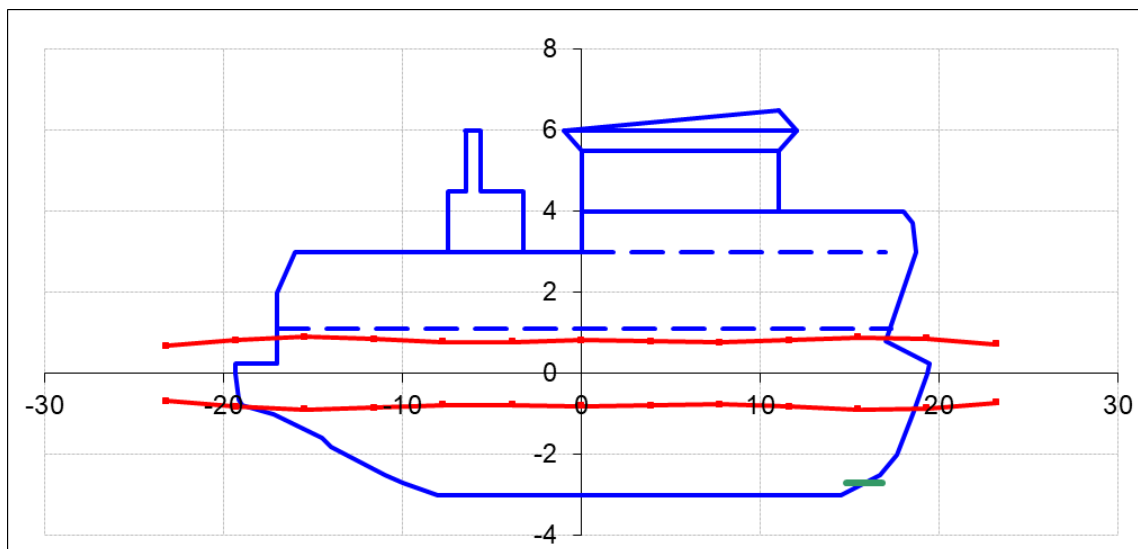
7 lentelė. Skaičiavimo rezultatai

Inercinių jėgų koeficientai		Koeficientai lygčių sistemai spręsti	
a_{33} , t	533,7	a_0	1,0150E+09
a_{35} , tm	582,9	b_0	-6,2476E+08
a_{53} , tm	582,9	c_0	-9,9045E+06
a_{55} , tm^2	46843,5	d_0	1,2456E+06
Dempferavimo jėgų koeficientai		e_0	-2,4572E+06
b_{33} , kN s/m	247,5	f_0	-6,5510E+06
b_{35} , kN s	2222,0	Δ	1,4205E+18
b_{53} , kN s	601,0	ζ_1 , m	-0,008
b_{55} , kN s m	40388,9	ζ_2 , m	-0,003
Atstatomųjų jėgų koeficientai		ζ_0 , m	0,008
c_{33} , kN/m	1263,3	$\text{tg } \gamma_3$	-0,5
c_{35} , kN	-1203,0	γ_3	155,6
c_{53} , kN	-2398,4	ψ_1 , laipsn.	0,06
c_{55} , kN m	125693,9	ψ_2 , laipsn.	-0,33
Sužadinamųjų jėgų koeficientai		ψ_0 , laipsn.	0,34
d_{33} , kN	-3700,7	$\text{tg } \gamma_5$	5,119
d_{35} , kN	-6624,7	γ_5	79,0
d_{53} , kN	-7820,1		
d_{55} , kN	-310030,6		
e_{33} , kN	754,9		
e_{35} , kN	6776,8		
e_{53} , kN	1833,0		
e_{55} , kN	123180,9		
Sužadinamosios jėgos			
α_3 , kN	60,9		
β_3 , kN	53,2		
α_5 , kN	372,9		
β_5 , kN	1928,6		

Šiose lentelėse rezultatai gauti naudojant „IF“ funkciją su formulėmis, kurios buvo pateiktos 2.2 skyriuje. Pirmoje lentelėje matome, kad yra gauti inercinių jėgų vertikalaus ir kilinio supimosi koeficientai a_{33} , = 533,7 t, a_{35} = 582,9 t, kai supimasis priklauso nuo laivo. Taip pat gauti dempferavimo jėgų koeficientai b_{33} = 247,5 kN, b_{35} = 2222 kN, atstatomųjų jėgų koeficientai c_{33} = 1263,3 kN/m, c_{35} = - 1203 kN, sužadinamųjų jėgų koeficientai d_{33} = - 3700,7 kN, d_{35} = - 6624,7 kN.

Antroje lentelėje matome, kad apskaičiavus yra gautos laivo svorio centro aplikatės ir gauti laivo kilinio supimosi kampai, kurie reikalingi tolimesniam skaičiavimui.

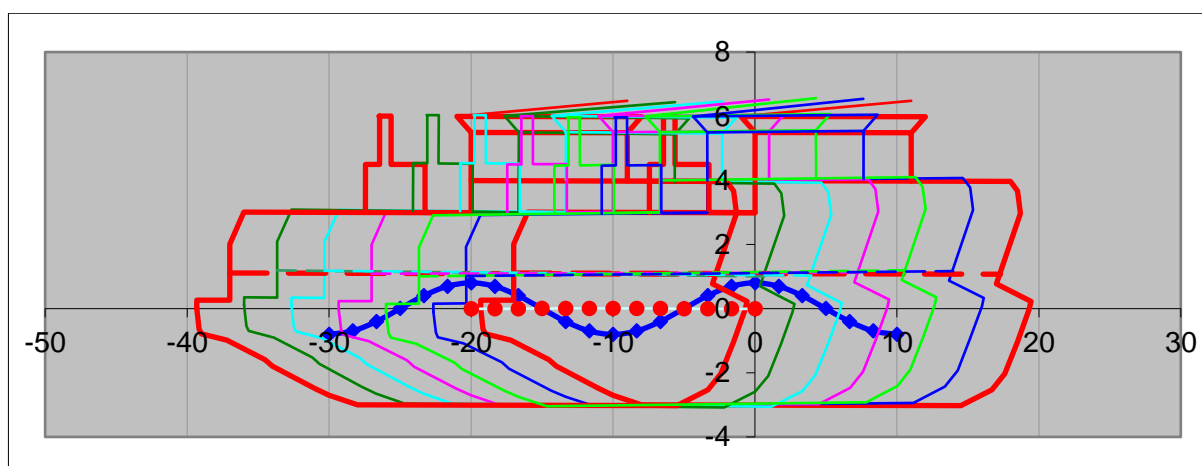
Įvedus pagrindinius duomenis „*Mintis*“ laivo, gauname denio užliejimo grafiką, kai bangos ilgis 40 metrų, juda statmenai bangoms 8 mazgų greičiu (žr. 11 pav.).



11 pav. KU mokslinio – tiriamojo laivo su povandeniniu sparnu denio užliejimo grafikas

Paveikslėlyje matyti raudona linija pažymėtas bangavimas ir laivo padėtis, tai judėjimas per bangą, kai laivas panyra ir išnyra. Matome, kad prie laivo pritvirtintas sparnas lieka po vandeniu, neiškyla virš, taip pat bangos neužlieja denio.

Taip pat gauname grafiką, kuris nurodo laivo „*Mintis*“ supimosi pobūdį įvairiais laiko momentais. Laivui judant 8 mazgų greičiu, statmenai bangoms, kai bangos ilgis 40 metrų su povandeniniu sparnu (žr. 12 pav.).



12 pav. KU mokslinio – tiriamojo laivo supimosi pobūdis įvairiais laiko momentais.

Paveiksle matyti 6 laivo fazės. Šios fazės parodo laivo padėtį 1 bangos ciklo metu, t. y., nuo to momento, kai laivas susiduria su banga iki to momento, kai laivas grįžta į tą pačią padėtį prieš antrą bangą.

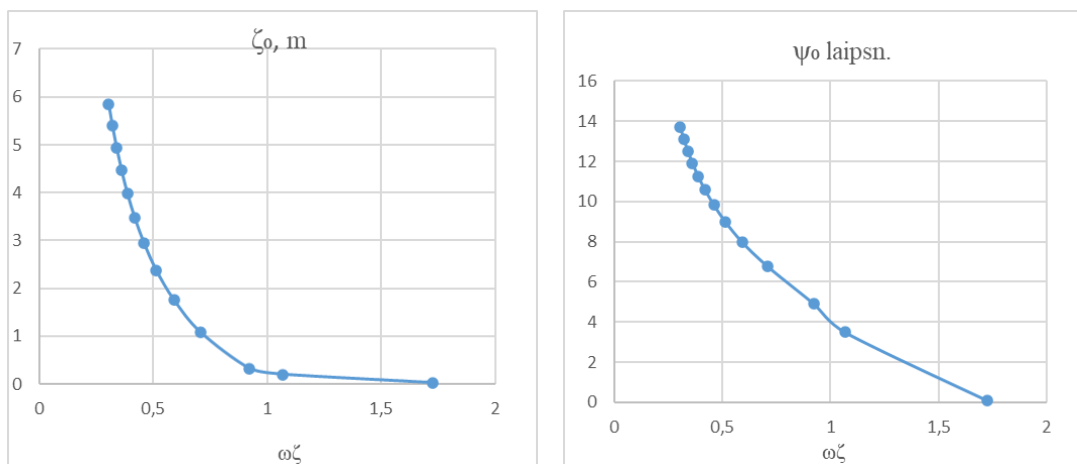
Pradedamas pirmas bandymas, kai suvedamos laivapriekinio sparno charakteristikos. Atliekami 3 skirtingi bandymai, kai keičiamas sparno atstumas: 12,8 m, 14,8 m, 16,8 m atitraukti nuo midelio (žr. 8 lentelę).

8 lentelė. Laivapriekinio sparno charakteristikos

Sparno koeficientai			Sparno koeficientai			Sparno koeficientai		
K_1^{kn} 1	K_2^{kn} 2	K_3^{kn} 3	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	0	0	0
	α^{kn}_0 , laipsn.	0		α^{kn}_0 , laipsn.	0		α^{kn}_0 , laipsn.	0
	$dC_y/d\alpha^{kn}$	4,570		$dC_y/d\alpha^{kn}$	4,570		$dC_y/d\alpha^{kn}$	4,570
	a^{kn} , m	3		a^{kn} , m	3		a^{kn} , m	3
	b^{kn} , m	2		b^{kn} , m	2		b^{kn} , m	2
	λ^{kn}	1,5		λ^{kn}	1,5		λ^{kn}	1,5
	z^{kn} , m	0,3		z^{kn} , m	0,3		z^{kn} , m	0,3
	S^{kn} , m ²	3		S^{kn} , m ²	3		S^{kn} , m ²	3
	x^{kn} , m	13		x^{kn} , m	15		x^{kn} , m	17
	l^{kn} , m	12,79		l^{kn} , m	14,79		l^{kn} , m	16,79
	p^{kn}	1		p^{kn}	1		p^{kn}	1
	h^{kn} , m	2,7		h^{kn} , m	2,7		h^{kn} , m	2,7

Lentelėse žalia spalva yra suvedami duomenys, o balti langeliai yra paskaičiuojami. Pasirinkta buvo, kad sparno ilgis 3 m, o plotis 2 m, taip pat sparno pastatymo aukštis nuo pagrindinės plokštumos yra 0,3 m.

Pirmiausia paskaičiuojami rezultatai nustatant 12,8 metrų atstumu nuo midelio. Gavus rezultatus (2 priedas) programa sudaro vertikalų ir kilinį supimosi grafiką, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 13 pav.).

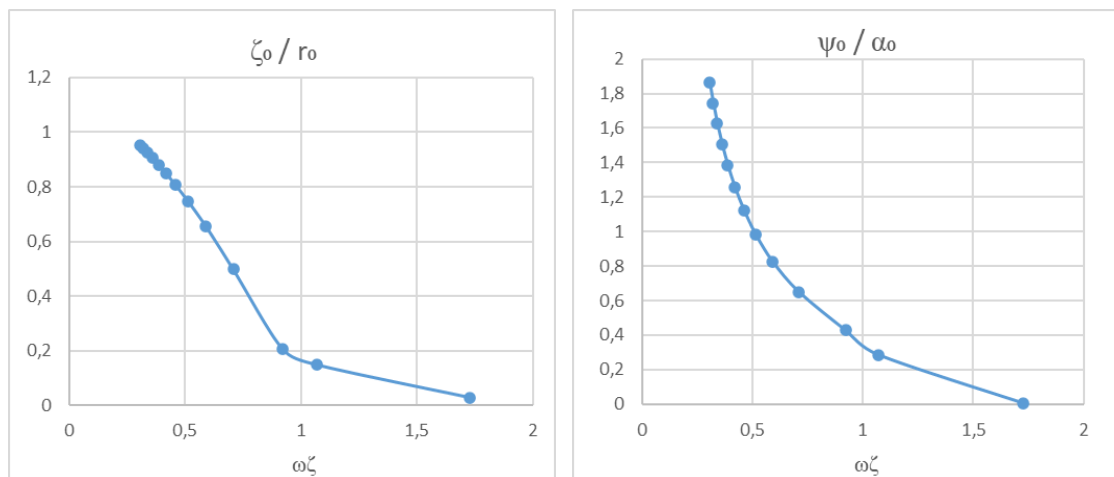


13 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalų ir kilinį supimosi priklausomybės nuo dažnio

Pirmame grafike matyti, kad didesnės amplitudės prasideda $\omega\zeta = 1$, kai laivą užkelia net iki 6 m aukščio.

Antrame grafike matyti, kaip laivas supasi, kad prie 0,5 dažnio laivo kilinis supimasis siekia 9° kampą. Laivo supimasis labai didelis iki 1 dažnio, po to mažėja.

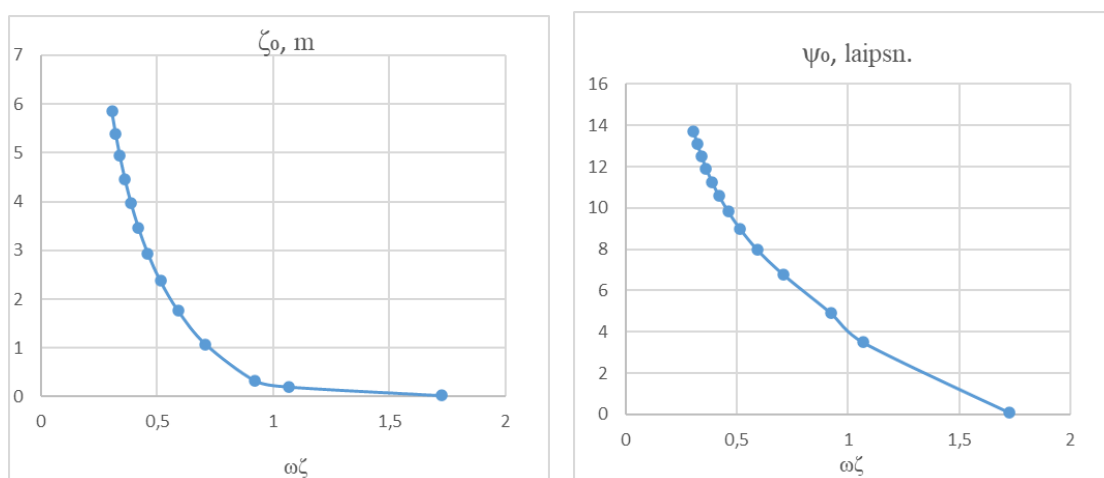
Toliau gauname vertikalios supimosi ir amplitudžių charakteristikos grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 14 pav.).



14 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalios supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos

Pirmame grafike matome bangos aukščius, kur parodo kiek pakyla ir koks yra sąlyginis dydis. Antrame grafike matome laivo kampo ir bangos kampo priklausomybę, kai kuo didesnis bangos ilgis tuo didesnis kampas. Dažnis priklauso nuo bangos ilgio.

Sekantį paskaičiuojame nustatant 14,8 metrų atstumu nuo midelio. Programa paskaičiavus rezultatus (3 priedas) gauna vertikalios ir kilinio supimosi grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 15 pav.).

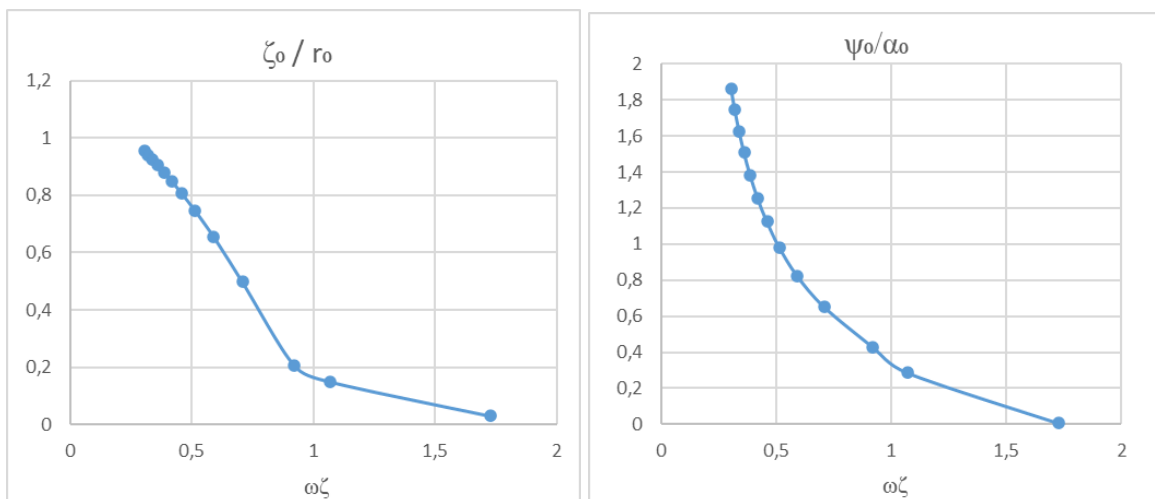


15 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalios ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio

Pirmame grafike matyti, kad didesnės amplitudės prasideda $\omega\zeta = 1$, kai laivą užkelia net iki 6 metrų aukščio.

Antrame grafike matyti, kaip laivas supasi, kad prie 0,4 dažnio laivo kilinis supimasis siekia 10° kampą. Laivo supimasis labai didelis iki 1 dažnio, po to mažėja.

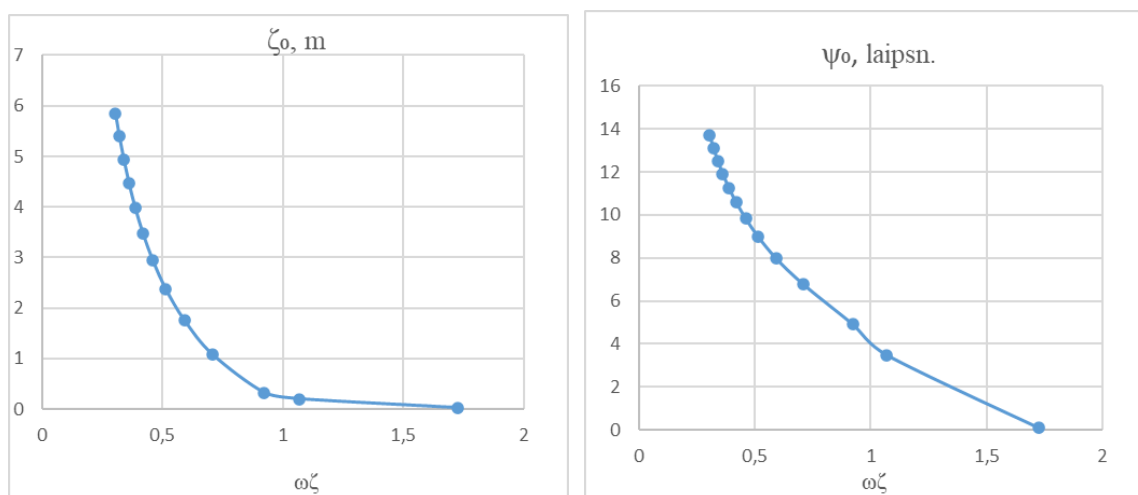
Toliau gauname vertikalios supimosi ir amplitudžių charakteristikos grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 16 pav.).



16 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalios supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos

Pirmame grafike matome bangos aukščius, kur parodo kiek pakyla ir koks yra sąlyginis dydis. Antrame matome laivo kampo ir bangos kampo priklausomybę, kai kuo didesnis bangos ilgis tuo didesnis kampas. Dažnis priklauso nuo bangos ilgio.

Toliau paskaičiuojami rezultatai nustatant 16,8 metrų atstumu nuo midelio. Gavus rezultatus (4 priedas) programa sudaro vertikalios ir kilinio supimosi grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 17 pav.).

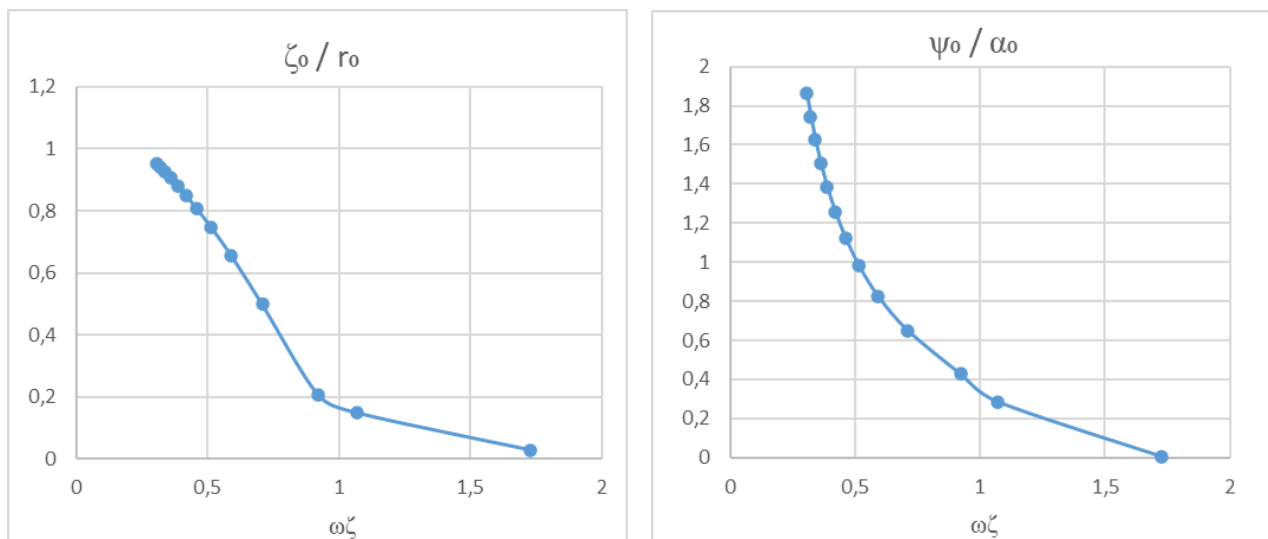


17 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu vertikalios ir kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio

Pirmame grafike matyti, kad didesnės amplitudės prasideda $\omega\zeta = 1$, kai laivą užkelia net iki 6 metrų aukščio.

Antrame grafike matyti, kaip laivas supasi, kad prie 0,7 dažnio laivo kilinis supimasis siekia 7° kampą. Laivo supimasis labai didelis iki 1 dažnio, po to mažėja.

Toliau gauname vertikalų supimosi ir amplitudžių charakteristikos grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 18 pav.).

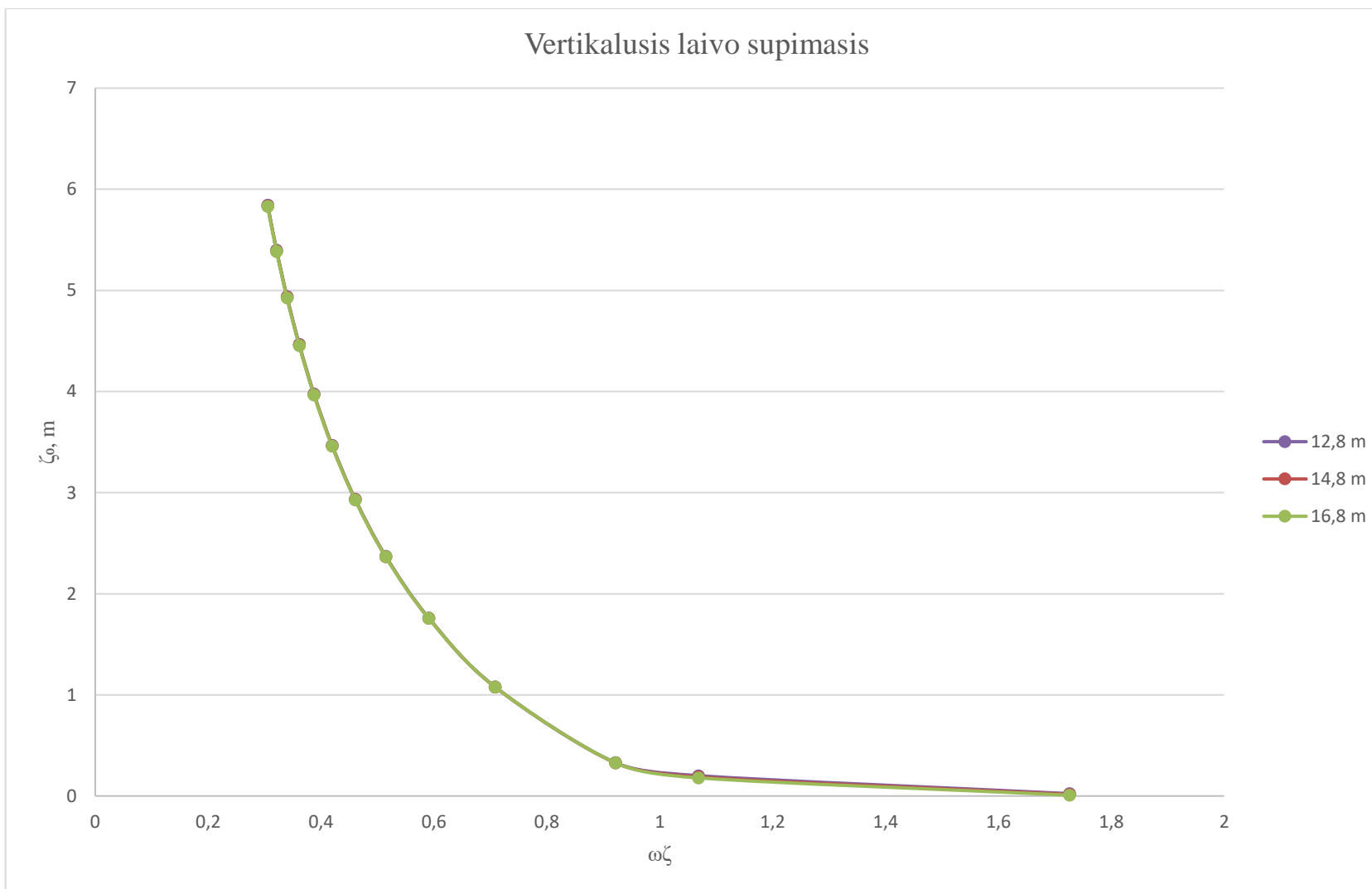


18 pav. KUMTL su povandeniniu sparnu katamarano vertikalų supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos

Pirmame grafike matome bangos aukščius, kur parodo kiek pakyla ir koks yra sąlyginis dydis. Antrame matome laivo kampo ir bangos kampo priklausomybę, kai kuo didesnis bangos ilgis tuo didesnis kampas. Dažnis priklauso nuo bangos ilgio.

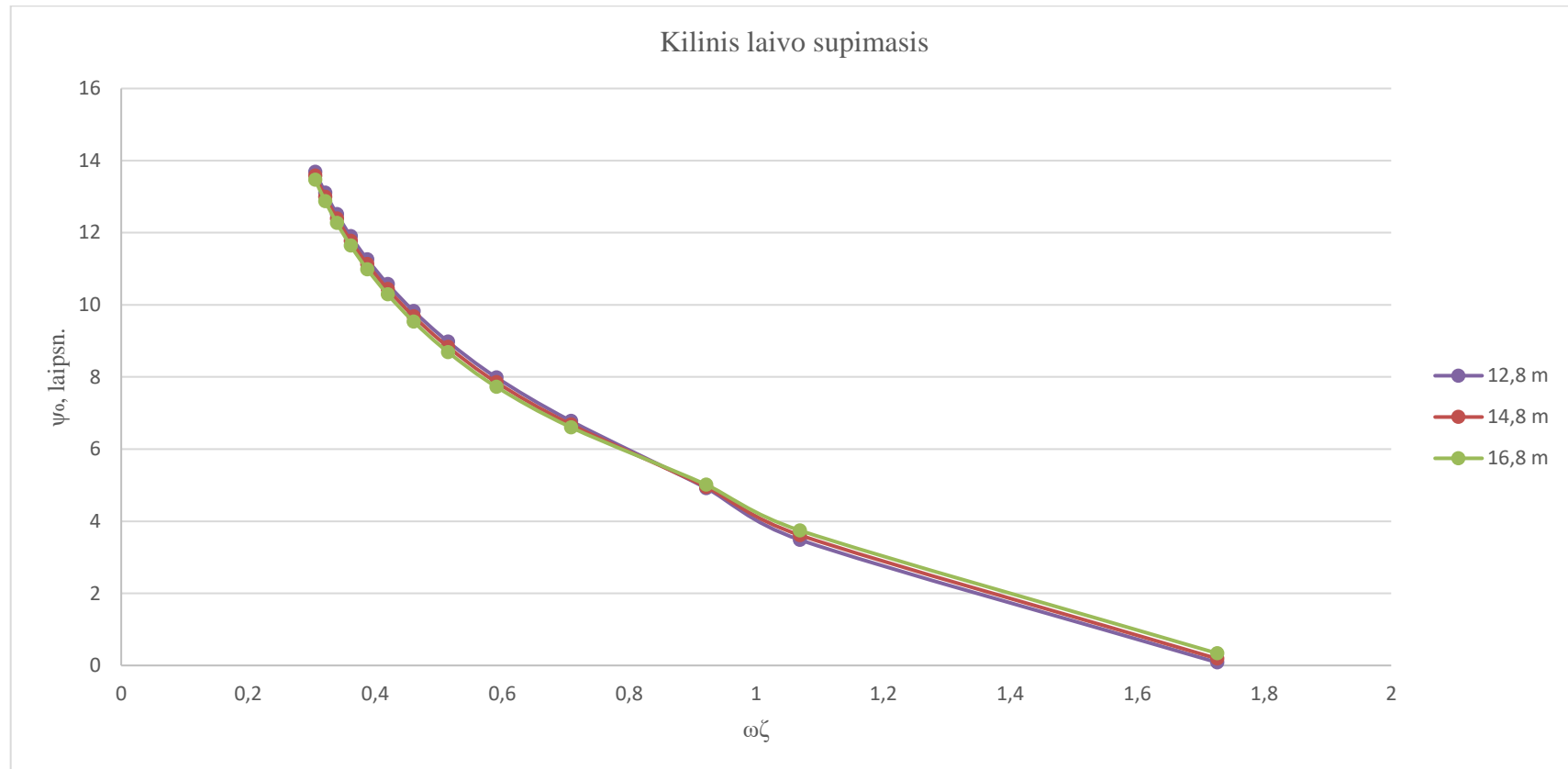
Iš gautų rezultatų sudaromos vertikalų (žr. 19 pav.) supimosi priklausomubė nuo bangavimo intensyvumo diagrama. Šios kreivės lyginamos, norint sužinoti, kuris iš 12,8 m, 14,8 m ir 16,8 metrų atstumu sparno padėtis yra efektyviausia tikrinant vertikalų ir išilginį supimąsi.

Pagal grafikus matome, kad vertikalų supimasis beveik nesikeičia, tik ties 1 dažnio matome, kad sparnas 16,8 metrų nustatytu atstumu, truputį mažiau pakyla. Tačiau galima sakyti, kad visi yra vienodai efektyvūs (žr. 19 pav.).



19 pav. 12,8 m, 14,8 m ir 16,8 m atstumu, vertikalaus supimosi priklausomybės nuo dažnio palyginimas

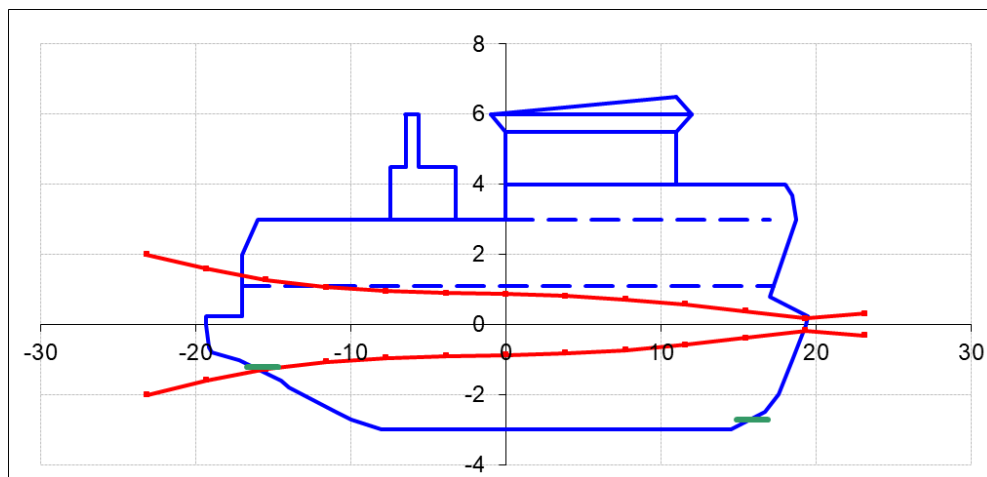
Sudaromas kilinio supimosi priklausomubė nuo bangavimo intensyvumo diagrama (žr. 20 pav.). Šios kreivės lyginamos, norint sužinoti, kuris iš 12,8, 14,8, 16,8 metrų atstumu sparno padėtis yra efektyviausia tikrinant vertikalų ir išilginį supimąsi.



20 pav. 12,8 m, 14,8 m ir 16,8 m atstumu kilinio supimosi priklausomybės nuo dažnio palyginimas

Pagal grafikus matome, kad kilinis supimasis keičiasi, iki bangos ilgio 50 metrų, kilinis supimasis mažėja traukiant sparną link midelio, o kai bangos ilgis virš 50 metrų – atvirkščiai, kuo toliau sparnas nuo midelio, tuo mažesnis supimasis ir tuo didesnis efektas. Bet jeigu pažiūrėti į supimosi kampus, tai skirtumas siekia vos $0,1^\circ$.

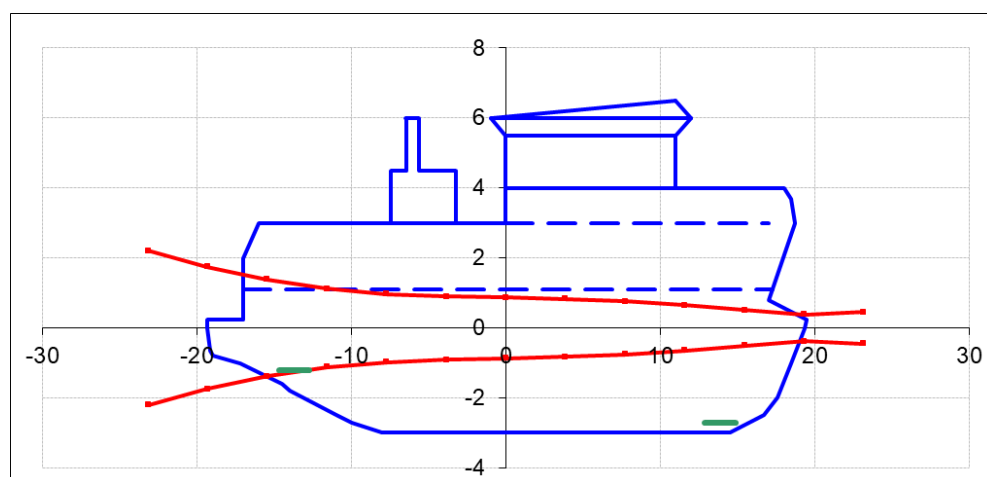
Pradedamas antras bandymas, kai išdėstomas laivapriekinis ir laivagalinis sparnas „Excel“ programoje ir ieškomas geriausias variantas. Buvo sudaryti denio užliejimo grafikai, kai bangos ilgis nuo 10 m iki 300 m. Pirmo priartėjimo gautas grafikas, kai laivagalinis ir laivapriekinis sparnas nustatytas 16,8 m nuo midelio (žr. 21 pav.).



21 pav. „Mintis“ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 16,8 m, denio užliejimo grafikas

Šiame paveikslėlyje matyti, kad laivagalinis sparnas atitrauktas nuo midelio 16,8 m išnyra virš vandens ir negalima pritvirtinti prie korpuso, dėl to yra neefektyvus ir pasirenkamas kitas variantas, traukiant sparną į laivapriekį.

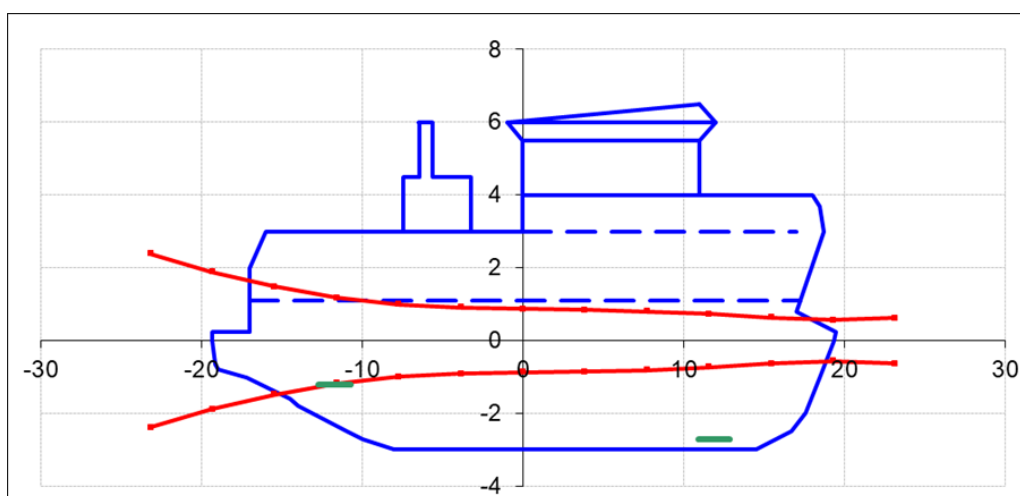
Darbe buvo atliekamas laivagalinio sparno padėties pasirinkimas ir nustatytas kitas variantas. Nustatytas denio užliejimo grafikas, kai laivagalinis sparnas atitrauktas 14,8 m nuo midelio (žr. 22 pav.).



22 pav. „Mintis“ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 14,8 m, denio užliejimo grafikas

Paveikslėlyje raudona linija pažymėtas bangavimas, kai viršutinė ir apatinė linija žymi bangos pado padėtį prie laivo korpuso. Matome, kad prie laivo pritvirtintas laivagalinis sparnas atitrauktas

nuo midelio 14,8 m nelieka po vandeniu, iškyla virš. Dėl to sudarome kitą denio užliejimo grafiką, kur laivagalinis sparnas 12,8 m nuo midelio (žr. 23 pav.).



23 pav. „Mintis“ laivo su laivagaliniais povandeniniais sparnais atitrauktais nuo midelio 12,8 m, denio užliejimo grafikas

Paveikslėlyje matyti, kad prie laivo pritvirtinti sparnai lieka po vandeniu, neiškyla virš. Taigi pasirenkama geriausia laivagalinio sparno padėtis 12,8 m atitraukta nuo midelio.

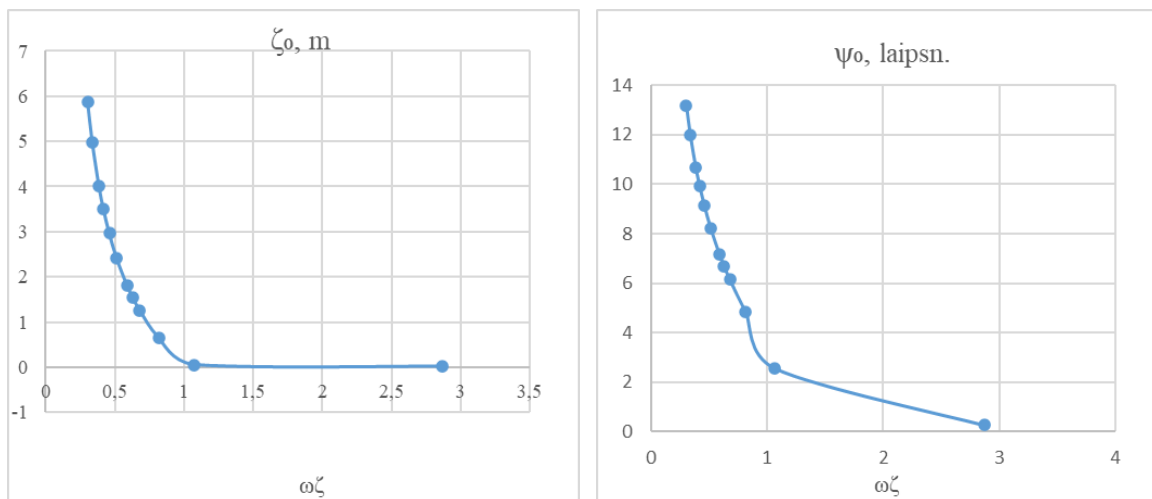
Toliau darbe suvedamos laivaprieikinio ir laivagalinio sparno charakteristikos. Nustatomas sparno atstumas, laivaprieikinis sparnas 12,8 m ir laivagalinis sparnas -12,8 m atitraukti nuo midelio (žr. 9 lentelę).

9 lentelė. Laivaprieikinio ir laivagalinio sparno charakteristikos

Laivaprieikinio sparno koeficientai			Laivagalinio sparno koeficientai		
K_1^{kn} 1	K_2^{kn} 2	K_3^{kn} 3	K_1^{kk} 4	K_2^{kk} 5	K_3^{kk} 6
0	0	0	0	0	0
α^{kn}_0 , laipsn.		0	α^{kk}_0 , laipsn.		0
$dC_y/d\alpha^{kn}$		4,570	$dC_y/d\alpha^{kk}$		4,570
a^{kn} , m		6	a^{kk} , m		6
b^{kn} , m		2	b^{kk} , m		2
λ^{kn}		3,0	l^{kk}		3,0
z^{kn} , m		0,3	z^{kk} , m		1,8
S^{kn} , m ²		6	S^{kk} , m ²		6
x^{kn} , m		13	x^{kk} , m		-13
l^{kn} , m		12,79	l^{kk} , m		-12,79
p^{kn}		1	p^{kk}		1
h^{kn} , m		2,7	h^{kk} , m		1,2
x		z	x		z
12,89		-2,7	-12,71		-1,2
10,89		-2,7	-10,71		-1,2

Lentelėse žalia spalva yra suvedami duomenys, o balti langeliai yra paskaičiuojami. Pasirinkta buvo, kad sparno ilgis 6 metrai, o plotis 2 metrai, taip pat laivapriekinio sparno pastatymo aukštis nuo pagrindinės plokštumos yra 0,3 metrų, o laivagalinio sparno 1,8 metrai.

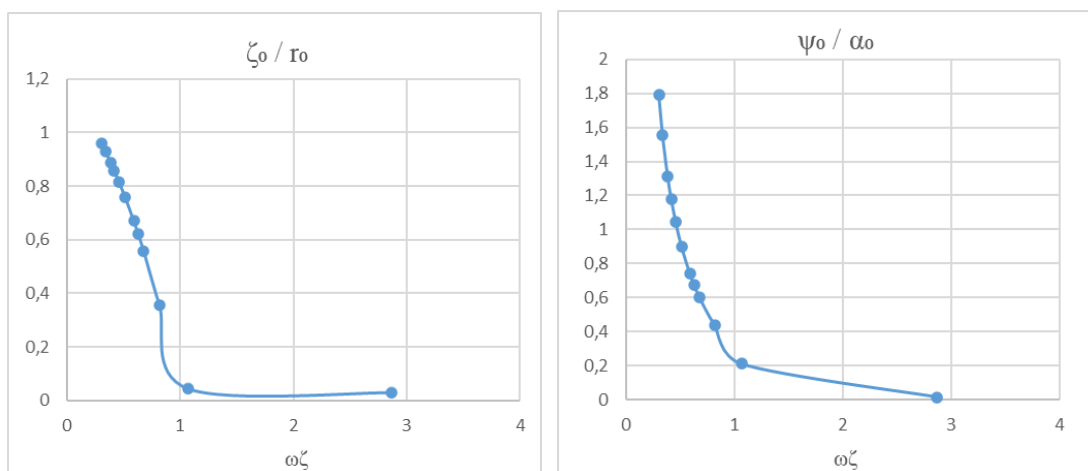
Suvedus duomenis yra paleidžiami skaičiavimai. Paskaičiuojami rezultatai su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais, nustatant, kad jie yra pasyvūs. Gavus rezultatus (5 priede) programa sudaro kilinio ir vertikalaus supimosi grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 24 pav.).



24 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais kilinio ir vertikalaus supimosi priklausomybės nuo dažnio

Pirmame grafike matyti, kad didesnės amplitudės prasideda $\omega\zeta = 1$, kai laivą užkelia net iki 6 metrų aukščio. O nuo 1 iki 3 dažnio supimasis lygus 0. Antrame grafike matyti, kaip laivas supasi, kad prie 0,5 dažnio laivo kilinis supimasis siekia 9° kampą. Laivo supimasis labai didelis iki 1 dažnio, po to mažėja.

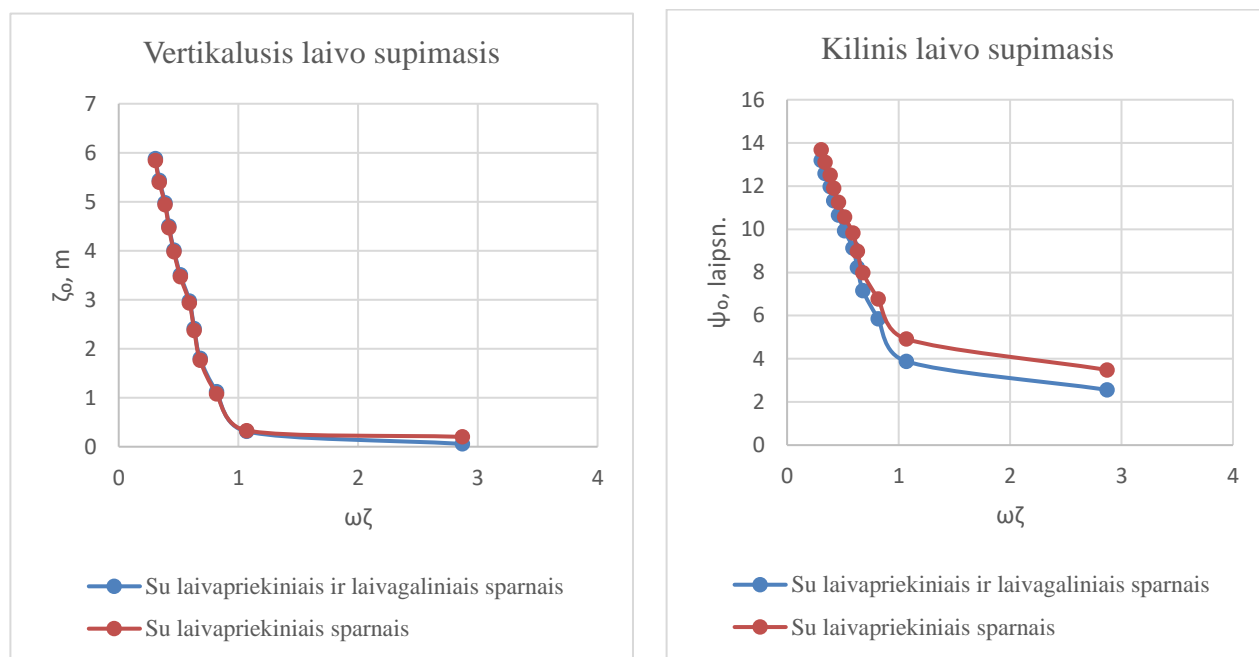
Toliau gauname vertikalaus supimosi ir amplitudžių charakteristikos grafikus, kurie priklauso nuo dažnio (žr. 25 pav.).



25 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais katamarano vertikalaus supimosi ir amplitudžių – dažnio charakteristikos

Pirmame grafike matome bangos aukščius, kur parodo kiek pakyla ir koks yra sąlyginis dydis. Antrame matome laivo kampo ir bangos kampo priklausomybę, kai kuo didesnis bangos ilgis tuo didesnis kampas. Dažnis priklauso nuo bangos ilgio.

Palyginame vertikalų ir kilinį laivo supimosi grafikus, sudarytus, kai sparnų pozicija patraukta į laivagalį -12,8 m ir į laivapriekį 12,8 m su laivapriekiniais sparnais, kurie patraukti 12,8 m nuo midelio sparnų rezultatų tyrimus (žr. 26 pav.).



26 pav. KUMTL su povandeniniais sparnais katamarano vertikalų ir kilinį supimosi priklausomybės nuo dažnio

Apibendrinant gautus rezultatus (2 ir 5 priedas), naudojant linijinę laivo supimosi teoriją su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais vertikalų supimosi amplitudės sumažėjo iki 0,1 m prie 40 m ilgio bangos, o kilinis supimasis sumažėjo 0,9°, tačiau paskaičiavus vidurkį, kampų supimosi amplitudės sumažėjo 0,6°.

3.4. KU Mokslinio – tiriamojo laivo supimosi skaičiavimai, naudojant „FLOW – 3D“ programinę įrangą

„FLOW – 3D“ tai skaičiuojamosios skysčių dinamikos (angl. CFD – computational fluid dynamics) programa, kuri pasaulyje naudojama nuo 1985 metų. Ši programa suteikia galimybę 3D aplinkoje nagrinėti skysčio dinamikos ir kieto kūno, turinčio šešis laisvės laipsnius, tarpusavio sąveiką. „FLOW – 3D“ programa yra puikus pasirinkimas moksliniams tyrimams atlikti, kadangi programa atlieka plataus masto skaičiavimus per sąlyginai mažą laiko tarpą, taip pat pateikia reikalingus grafikus bei viso tyrimo 3D vizualizaciją. Pagal Navier – Stokes formules šioje

programoje sukuriamas skysčio srautas pagal momentus, mases ir energijos dėsnius. „*FLOW – 3D*“ programa tiria srautą veikiančias jėgas, kai jos apteka kūną.

Tačiau ši simuliacinė programa turi ir trūkumų, kai reikalaujami dinamiškesni srauto režimai.

Visų pirma, reikėtų paminėti pagrindines eksperimento charakteristikas. Pirmiausia prieš pradėdant skaičiuoti „*FLOW – 3D*“ programa reikia įkelti į programą laivo modelį skaičiavimams. Mūsų darbe bus naudojamas KU mokslinių tyrimų laivo toks pat modelis, kurį naudojo Žemaitytė A. savo baigiamajame darbe (1 priedas).

Norint apskaičiuoti laivo hidrodinaminių jėgų dedamąsias, įvedame papildomus laivo duomenis, tai španhautų skerspjūvių plotus, grimzlę ir pločius.

Simuliacijos kūrimo eiga:

- 1) Naujos direktorijos sukūrimas skaičiavimo duomenims saugoti (*Add new simulation*).
 - 2) Fizinių dėsnų – reiškinių nustatymas:
 - Gravitacinių parametrų įvedimas (*Model setup / Physics / Gravity and non-inertial reference frame*). Įrašomas laisvojo kritimo pagreitis $9,81 \text{ m/s}^2$ z ašyje.
 - Aktyvuojame judančio kūno modelį uždedant prie (*GMO*) varnelę (*Model setup / Physics / Moving and simple deforming object*).
 - Nurodomi skysčio parametrai, uždedame varnelę ant langelio „Viscous flow“ (*Model setup / Physics / Viscosity and turbulence*).
 - 3) Nustatomi skysčio parametrai: vandens tankis $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ skirtuke (*Model setup / Fluids*).
 - 4) Įvedami išeišos dydžiai, kuriuos generuos programa, tai vertikalusis ir kilinis supimasis, (*Model setup / Output*).
 - 5) Nustatome laiko intervalą, po kurio programa užbaigs skaičiavimus, įvedamas (*finish time*) (*Model setup / General*) 120 sekundžių skirtuke, nes toks laiko intervalas yra pakankamas norint gauti gerus rezultatus. Taip laivo korpuso supimasis po pirmojo vandens srauto antplūdžio nusistovi ir tampa cikliškas. Nustatome laiko žingsnį – 0,05 skirtuke (*Model setup / Numerics*). Antrame langelyje paliekame 0, tai minimalus laiko žingsnis.
 - 6) Įkeliamė laivo geometrijos failą (*Model setup / Meshing & Geometry*) užduočių juostoje paspaudus mygtuką *Import geometry*. Suimportuojame komponentus, kur mūsų komponentai yra katamaranas ir pridėtinės stabilizavimo priemonės.
 - 7) Įkeliami 4 skaičiavimo tinkleliai (*Model setup / Meshing & Geometry*) parenkame tinklelio tipą (*Mesh type: Certesian*) ir paspaudžiame mygtuką pridėti (žr. 6 priedą).
- Programa atlieka skaičiavimus gan ilgai, dėl to norint sumažinti laiką, skaičiavimai atliekami tik vienai katamarano korpuso pusei, o kita pusė judės lygiai taip pat.

Naudojant tinklelį Nr. 3 taip pat mažinamas skaičiavimų laikas, nes kitu atveju tinklelį Nr. 2 reikėtų daryti labai tankų, kad pridėti stabilizuojantys sparnai skaičiuotūsi.

Sukuriami 4 tinkleliai:

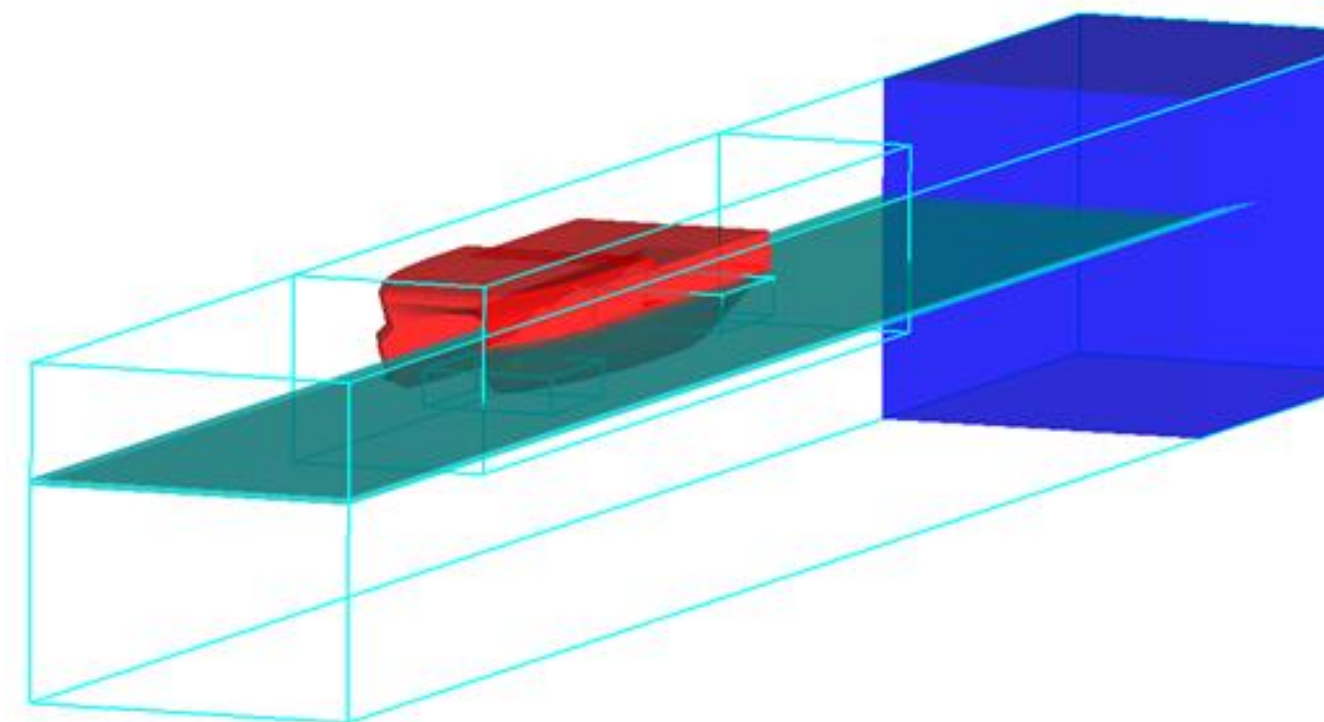
1 *tinklelis* – tai tyrimo zona, kurioje vyksta skysčio ir laivo korpuso judėjimas.

2 *tinklelis* – tai korpuso tinklelis.

3 *tinklelis* – tai laivapriekinių stabilizuojančių sparnų tinklelis.

4 *tinklelis* – tai laivagalinių stabilizuojančių sparnų tinklelis.

Gaunamas „*Mintis*“ laivo modelio 3D vaizdas su tinkleliais (žr. 27 pav.), kuri apteka skystis.



27 pav. 4 tinklelių nustatymo vaizdas

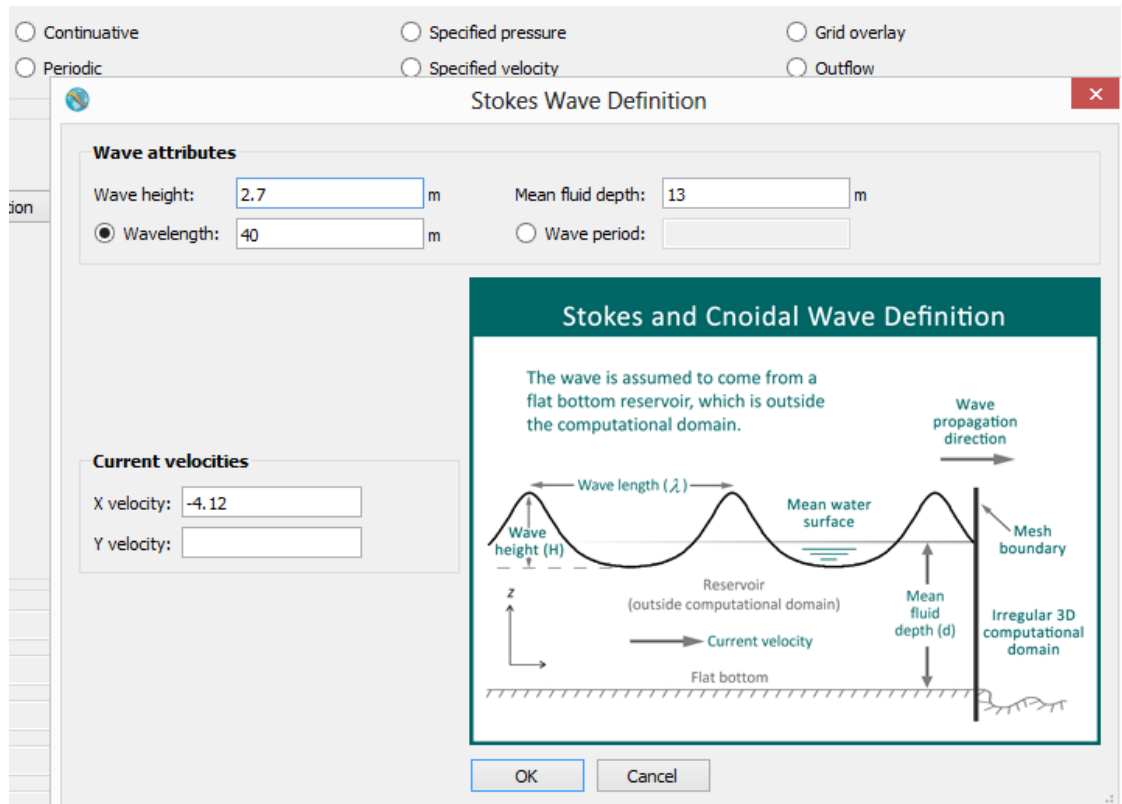
Eksperimento metu korpusas stovės vietoje, o skystis aptekantis korpusą judins aukštyn ir žemyn, taip pat dėl susidariusio slėgio apink, sukios aplink išilginę ašį.

8) Sekantis eksperimento žingsnis – skaičiavimo masyvo kiekvienos sienelės pradinių sąlygų nustatymas, tai atliekama programos *Boundary* juostoje (žr. 28 pav.). Parenkami korpuso judėjimo nustatymai paspaudus ant *Component 1:5415 korpusas*, tuo met apačioje atsiranda nustatymų skiltis ant, kurios paspaudus *Type Of Moving Object* atsiranda mygtukas *EDIT*.

Įvedami parametrai X_{max} grafoje:

- bangos amplitudė (2,7 m),
- periodas (3 sekundės),
- vandens srauto greitis (4,12 m/s),

- vandens gylis (13 m),
- bangos ilgis (40 m).



28 pav. Tinklelio sienelių nustatymai.

Xmin – grafoje nustatome slėgį, o kitose grafose: Ymin, Ymax, Zmin, Zmax yra simetrijos nustatymai, tai reiškia, jog simetrijos ribose nėra skaičiuojami vandens srauto greitis, veikiančios jėgos ar šlyties momentai.

Taigi nustatome, kad laivas galėtų judėti z ašimi vertikaliai ir sukstis y ašimi. Jei objektui neleidžiama judėti ašimi nustatoma *Prescribed*, o jei leidžiama *Coupled motion*.

9) Kiti nustatymai įvedami *Mass Properties* skirtuke, tai inercijos momentų ir masės centro koordinatėjų nustatymas.

Laivo svorio centro koordinatės, masė ir inercijos momentai nurodyti du kartus mažesni nei yra, nes programa skaičiavimus atlieka tik pusei katamarano korpuso daliai.

Aplink x, y ir z ašis laivo masės inercijos momentai apskaičiuojami [16]:

$$I_{xx} = \int_M (z^2 + y^2) dm \approx \sum_i^1 m_i (z_i^2 + y_i^2) \quad (14)$$

$$I_{yy} = \int_M (x^2 + z^2) dm \approx \sum_i^1 m_i (x_i^2 + z_i^2) \quad (15)$$

$$I_{zz} = \int_M (z^2 + x^2) dm \approx \sum_i^1 m_i (z_i^2 + x_i^2) \quad (16)$$

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. [37].

$$J_{ii} + \lambda_{kk} = MR_{ii}^2 \quad (17)$$

Čia:

J_{ii} – laivo masės inercijos momentas, ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

λ_{kk} – hidrodinaminė vandens masė, (kg/m^3);

M – laivo masė, (kg);

R_{ii} – laivo masės inercijos spindulys.

Laivo masės inercijos spindulys kinta šešiose ašyse. [16].

$$R_{xx} = 0,3B - 0,4B \quad (18)$$

$$R_{yy} = 0,22L - 0,28L \quad (19)$$

$$R_{zz} = 0,22L - 0,28L \quad (20)$$

čia: B – katamarano vieno korpuso plotis, (m);

L – katamarano korpuso ilgis, (m);

Apskaičiuojame inercijos momentus apie x, y, z ašis.

$$J_{11} = \frac{M(0,4B)^2}{1,3} = \frac{324730(0,4 \cdot 3,975)^2}{1,3} = 6,315 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (21)$$

$$J_{22} = \frac{M(0,28L)^2}{1,3} = \frac{324730(0,28 \cdot 38,64)^2}{1,3} = 2,924 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (22)$$

$$J_{33} = J_{22} = 2,924 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (23)$$

čia: 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.

Laivo masės inercijos momentai y ir z ašies atžvilgiu yra laikomi vienodi.

Tolimesnė programos paleidimo eiga:

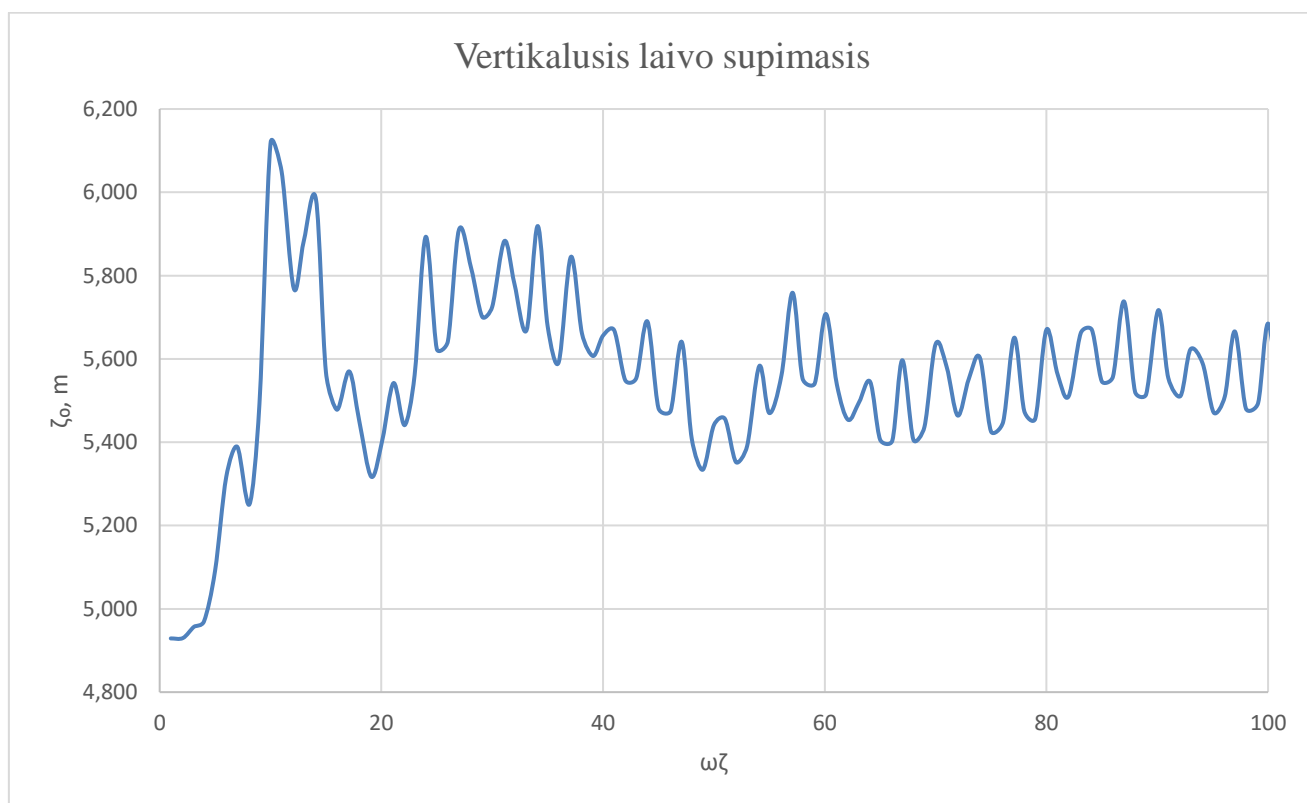
10) Paleidžiama programa – *START SIMULATION* ir paliekame programą skaičiuoti. Skaičiavimų laikas priklauso nuo tinklelių tankumo, kuo tankesnis tinklelis, tuo daugiau elementų programa turi suskaičiuoti.

11) Baigus simuliaciją rezultatų duomenys išgaunami skiltyje (*Analyze / Probe*), nustatčius (*Data source – General history ; Output files – Text*) ir pasirinkus norimus gauti rezultatus pateiktame sąraše (žr. 7 priedą). Paspaudus mygtuką *Render* apatinėje užduočių juostoje bus sugeneruoti duomenys, pagal nustatytus kriterijus ir formą.

3.4.1. Pirmas laivo supimosi stabilizavimo tyrimo atvejis.

Duomenys pateikti gavus rezultatus naudojant „*FLOW – 3D*“ programą. Atliekant pirmo tyrimo vertikalų supimosi skirtumui kas 1 s naudojant laivapriekinius stabilizavimo sparnus pakeltus 2 metrus nuo pagrindinės plokštumos (žr. 9 pav.).

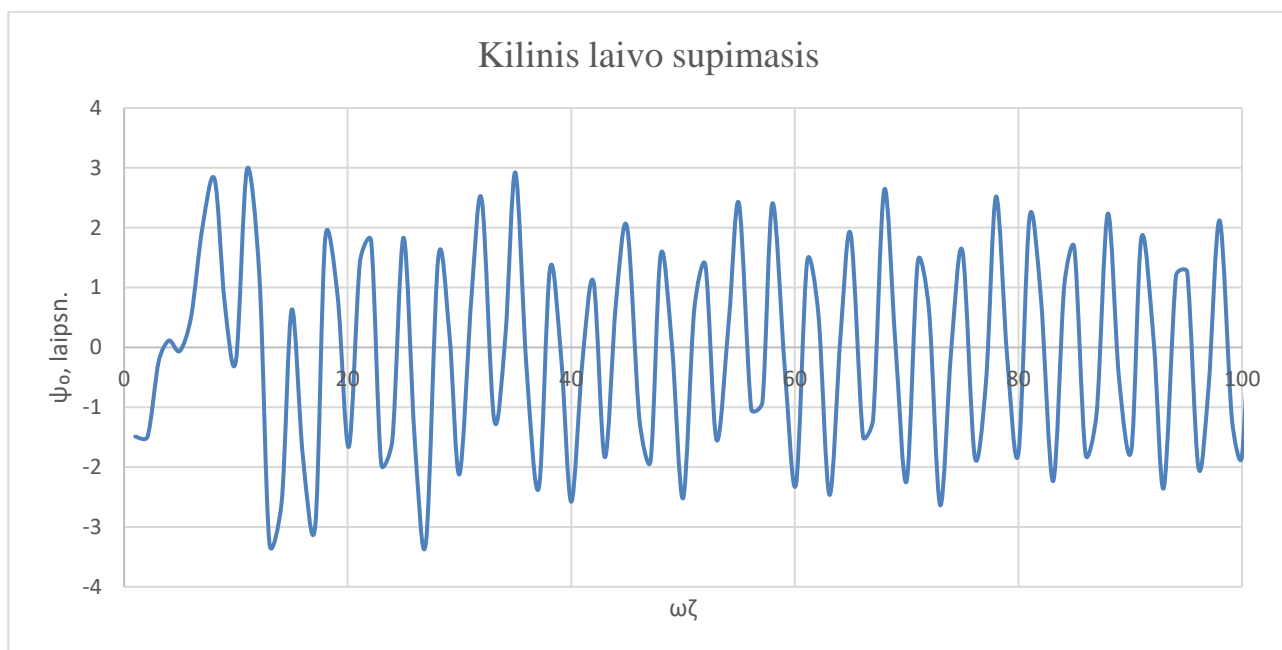
Pirmiausia, gaunamas vertikalusis laivo supimosi grafikas (žr. 29 pav.) iš gautų rezultatų (8, 9, 10 priedas).



29 pav. Vertikalusis laivo „*Mintis*“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais

Eksperimentas pradedamas vykdyti, kai laivas stovi ramioje padėtyje, todėl iš grafiko matyti, kad eksperimento pradžioje rezultatai labai nepastovūs. Rezultatai tampa panašūs tam tikrame diapazone, kai nusitovėjimas prasideda, ties 70 sekunde.

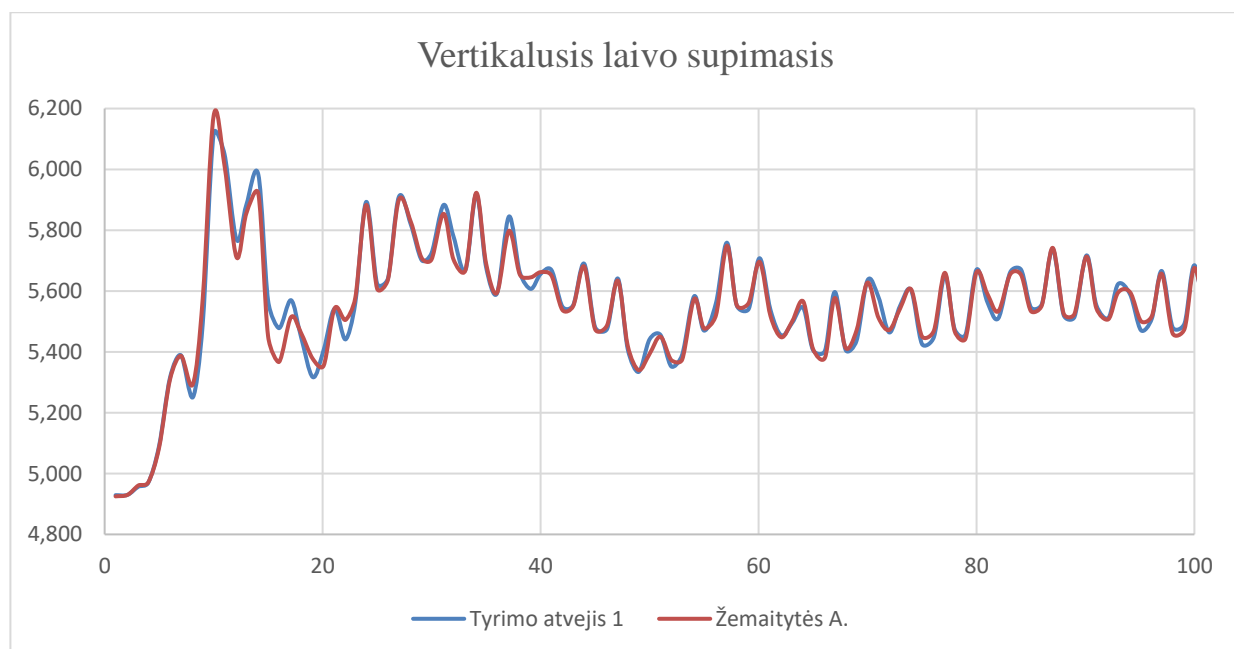
Sekantis gautas grafikas (žr. 30 pav.), tai kilinio laivo supimasis, gautas iš 8, 9, 10 priede supimosi kampų.



30 pav. Kilinis laivo „Mintis“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais

Matome, kad supimosi kampai siekia iki 3,2 ir -3,2 laipsnius, o nusistovėjimas yra nuo 60 s iki 100 s.

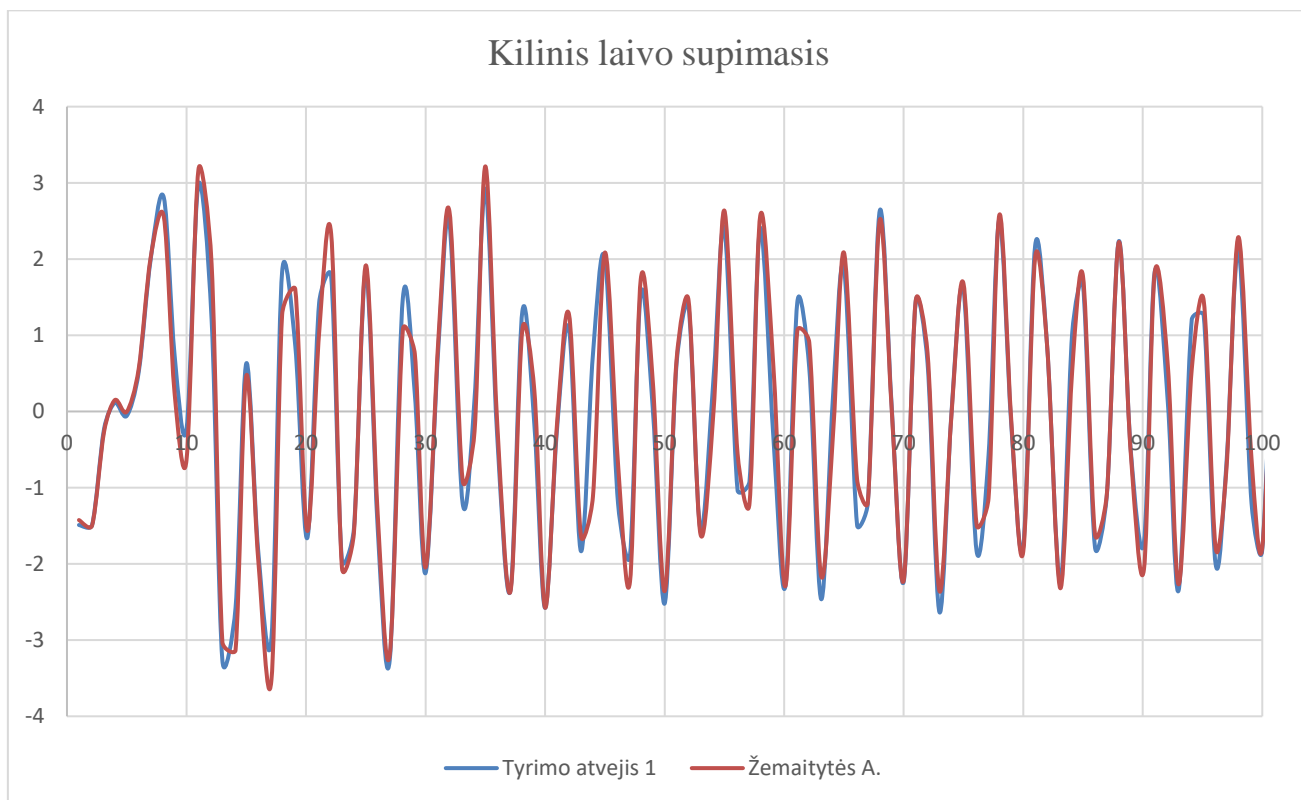
Atliekamas vertikalūs laivo supimosi palyginimas su Žemaitytės A. tyrimu (žr. 31 pav.).



31 pav. Analizuojami vertikalūs supimosi „FLOW – 3D“ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 1“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).

Lyginant Žemaitytės A. supimosi rezultatus ir pirmą tyrimą, matyti, kad skirtumai nėra ryškūs, tačiau sparnai pirmo tyrimo metu daro mažesnę įtaką laivo supimuisi. Sparnai neefektyviai dirba, nes tyrimo metu buvo matyti, kad iškyla aukščiau vandens ir nėra prasmės kelti aukščiau (žr. 8, 9, 10 priedą).

Atliekamas kilinis laivo supimosi palyginimas su Žemaitytės A. tyrimu (žr. 32 pav.).



32 pav. Analizuojami kilinio supimosi „*FLOW – 3D*“ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 1“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).

Palyginus abu tyrimus matyti, kad „Žemaitytės A.“ tyrime kilinis supimasis yra gan panašus, tačiau Žemaitytės A. tyrime supimasis yra mažesnis. Taip pat pastebėta, kad sparnas išnyra virš vandens, todėl sumažina jo efektyvumą ir toks sparno iškilimas nėra efektyvus.

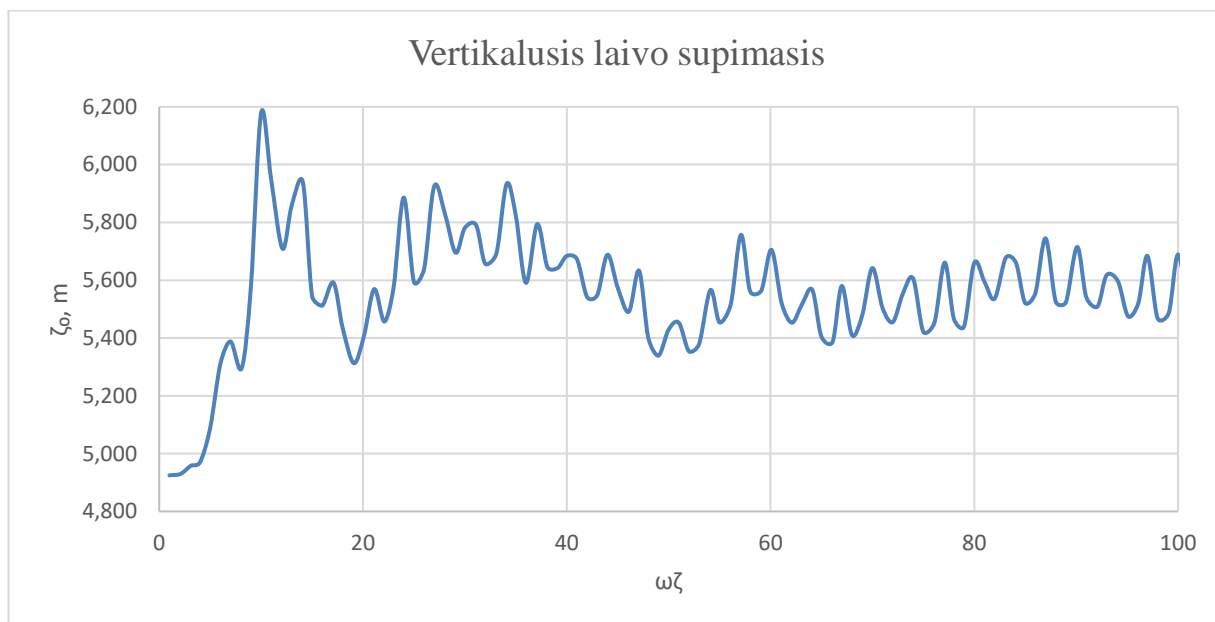
3.4.2. Antras laivo supimosi stabilizavimo tyrimo atvejis.

Duomenys taip pat pateikti gavus rezultatus naudojant „*FLOW – 3D*“ programą. Atliekant antro tyrimo supimosi skirtumui kas 1 s naudojant laivapriekinius ir laivagalinius stabilizavimo sparnus (žr. 9 pav.).

Grafinėje išraiškoje horizontalioji ašis žymi laiką t (s), o vertikalioji ašis kiliniame supime žymi kampo kitimo greitį, vertikaliajame supime – amplitudė.

Eksperimentas pradedamas vykdyti, kai laivas stovi ramioje padėtyje matyti, kad eksperimento pradžioje rezultatai labai nepastovūs. Simuliacijos laikui bėgant pastovus bangavimas susidurdamas su korpusu, jį priverčia cikliškai siūbuoti, tačiau ciklinis siūbavimas nėra pastovus.

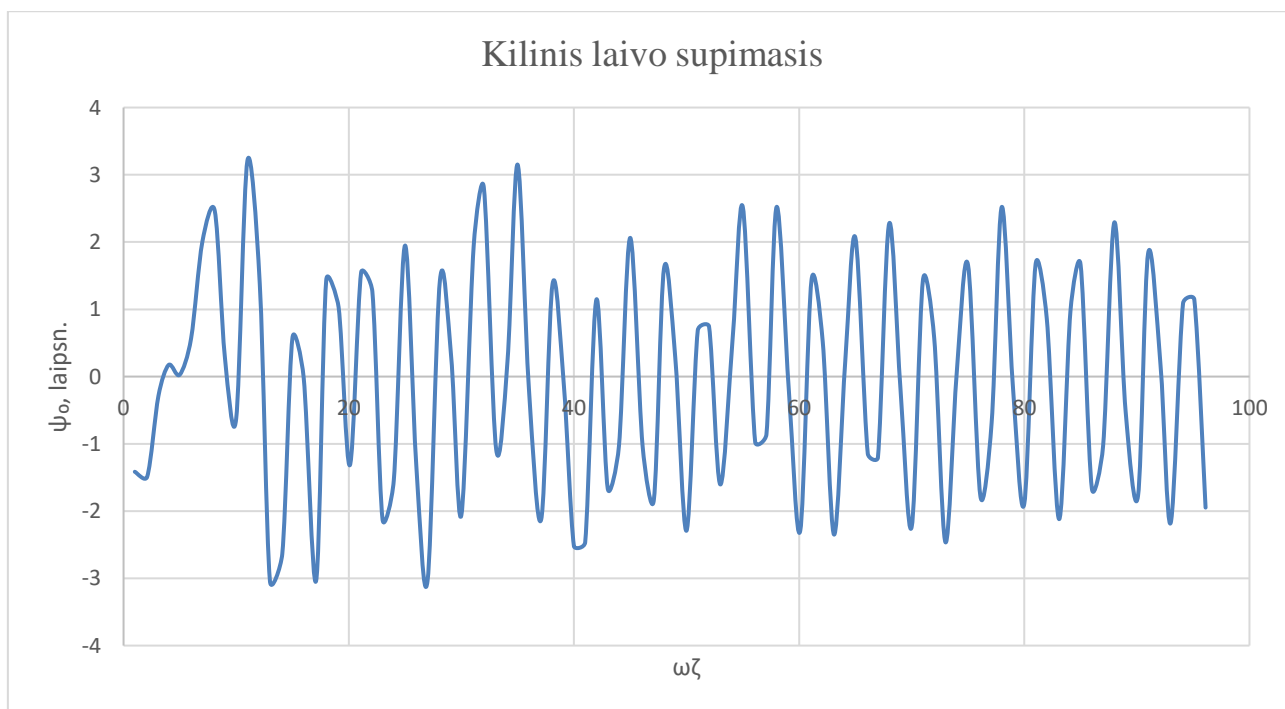
Pirmiausia paskaičiuotas vertikalusis laivo supimasis periodu 0 - 100 s (žr. 33 pav.).



33 pav. Vertikalusis laivo „*Mintis*“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais

Grafike matome, kad didžiausias supimosi pakilimas yra ties 10 s, po to supimasis mažėja, bet išlieka nepastovus ties 30 s, o ties 70 s supimasis tampa pastovus.

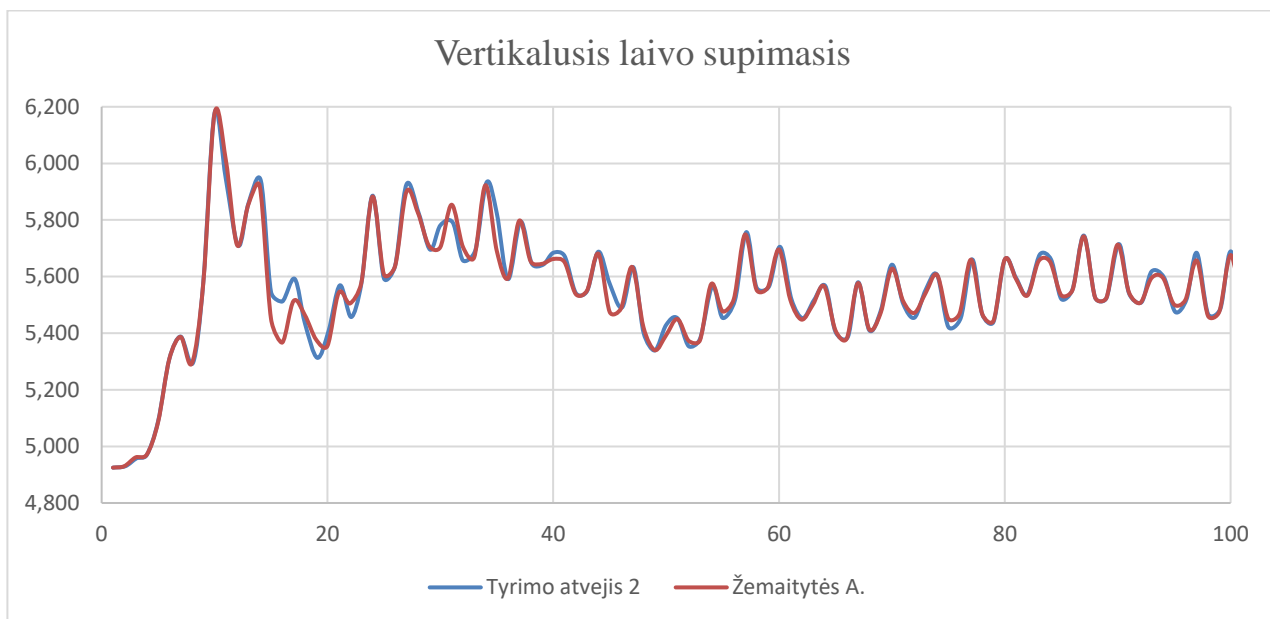
Sekantis gautas grafikas (žr. 34 pav.), tai kilinio laivo supimasis, gautas iš (žr. 8, 9, 10 priede) supimosi kampų.



34 pav. Kilinis laivo „*Mintis*“ supimasis su įdiegtais stabilizavimo sparnais

Matome, kad supimosi kampai siekia iki 3,2 ir -3,2 laipsnius, o nusistovėjimas yra nuo 60 s iki 100 s.

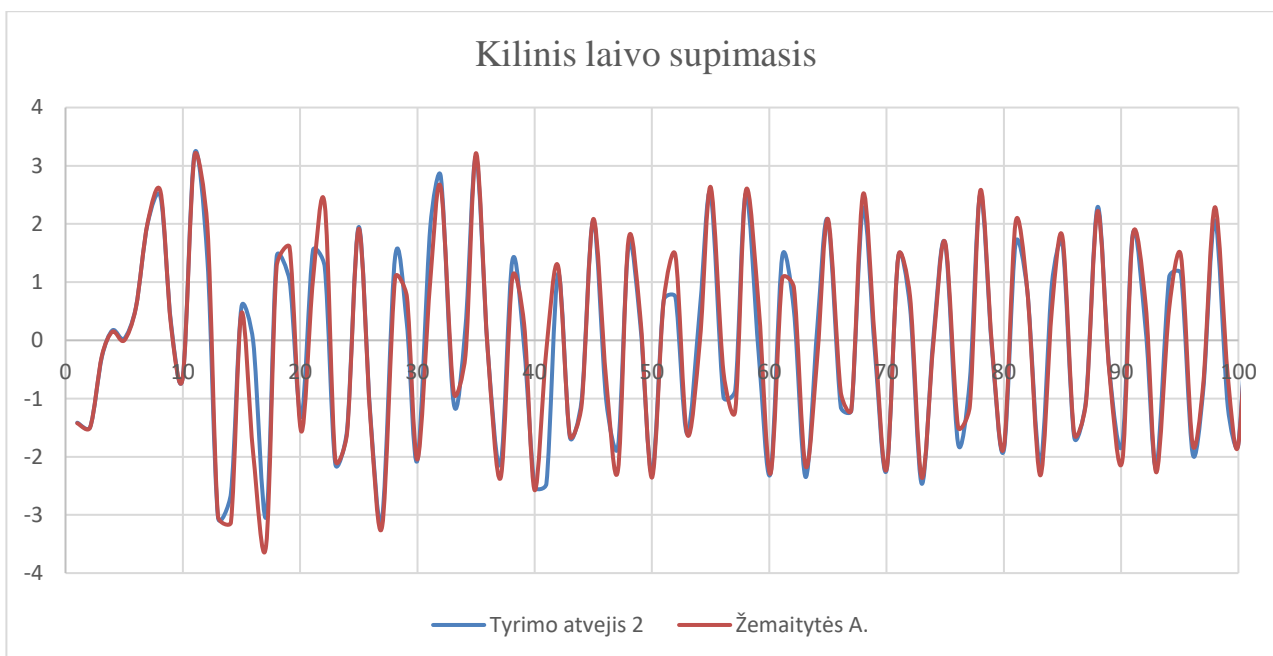
Atliekamas vertikalusis laivo supimosi palyginimas su Žemaitytės A. tyrimu (žr. 35 pav.).



35 pav. Analizuojami vertikalusis supimosi „*FLOW – 3D*“ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 2“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).

Lyginant Žemaitytės A. supimosi rezultatus ir antrą tyrimą matyti, kad skirtumai nėra ryškūs. Išanalizavus diagramą Žemaitytės A. tyrime sparnai daro didesnę įtaką laivo supimuisi.

Atliekamas kilinis laivo supimosi palyginimas su Žemaitytės A. tyrimu (žr. 36 pav.).



36 pav. Analizuojami kilinio supimosi „*FLOW – 3D*“ rezultatai lyginant „Tyrimo atvejis 2“ (mėlyna kreivė) su „Žemaitytės A.“ (raudona kreivė).

Palyginus abu tyrimus matyti, kad „Žemaitytės A.“ tyrime kilinis supimasis yra nežymiai didesnis ir galime teigti, kad mums pavyko sumažinti supimosi amplitudes iki $0,2^\circ$.

4. REZULTATŲ ANALIZĖ

KU mokslinių – tyrimų laivo vertikalaus ir kilinio supimosi tyrimų rezultatai, lyginami naudojant „Excel“ ir „FLOW – 3D“ programinės įrangos baigiamojo darbo gautais rezultatais, kurio tikslas nustatyti laivo povandeninio sparno efektyvumą, kai parametrai ir sąlygos buvo užduotos lygiai tokios pat.

Linijinio supimosi tyrimas naudojant „Excel“ sukurtą programą parodė:

- Su laivapriekiniais sparnais, vertikalusis laivo supimasis beveik nesikeičia. Laivo vertikalaus supimosi grafikuose gauta, kad sparno padėtys yra vienodai efektyvūs. O kilinis laivo supimasis keičiasi iki bangos ilgio 50 metrų, kilinis supimasis mažėja traukiant sparną link midelio, o kai bangos ilgis virš 50 m – atvirkščiai. Taigi kuo toliau sparnas nuo midelio tuo mažesnis supimasis ir tuo didesnis efektas, supimosi kampų skirtumas siekia vos $0,1^\circ$.
- Su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais, vertikalusis supimasis taip pat išlieka panašus ir nelabai keičiasi. O kilinis supimasis keičiasi ties 50 m ilgio bangos. Supimosi kampų dydis siekia $0,6^\circ$. Taigi kuo toliau sparnas nuo midelio tuo mažesnis supimasis ir tuo didesnis efektas.

Tyrimas naudojant „FLOW – 3D“ programinę įrangą parodė:

- Su laivapriekinio sparno iškelto 2 metrus virš pagrindinės plokštumos gauti rezultatai parodė, kad sparnai neefektyviai dirba, nes tyrimo rezultatuose buvo pastebėta, kad sparnai iškyla virš vandens. O kilinio laivo supimosi nusistovėjimas yra nuo 60 s iki 100 s. Vertikalaus supimosi amplitudės yra didesnės lyginant su Žemaitytės A. darbe gautais rezultatais. Todėl kelti sparnus aukščiau neefektyvu.
- Su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais, vertikalaus laivo supimosi nusistovėjimas vyksta ties 70 s. O kilinio laivo supimosi kampai nusistovi nuo 60 s iki 100 s. Palyginus abu tyrimus, matome, kad vertikalusis supimasis nelabai skiriasi, netgi Žemaitytės A. tyrime sparnai daro didesnę įtaką, tačiau nežymiai. O kilinis supimasis mūsų tyrime yra mažesnis ir supimosi kampo amplitudės pavyko sumažinti iki $0,2^\circ$.

Palyginus abiejų programų gautus rezultatus matome, kad supimosi kampų dydis skaičiuojant pagal linijinę supimosi teoriją sumažėja kampų dydis iki $0,6^\circ$, o atliekant eksperimentą „FLOW – 3D“ programa amplitudės sumažėjo iki $0,2^\circ$, taigi abiejų skaičiavimų metodu gauti vertikalaus supimosi rezultatai sutampa, o kilinis supimasis skiriasi $0,4^\circ$.

Skaičiuojant pagal linijinę teoriją priimta prielaida, kad sparnų galai yra pritvirtinti ir vandens srautas nuo jų neatitrūksta, o suformuojant SSD eksperimentą, vandens sparnų kraštinės yra atviros ir srautas nutrūksta. Dėl to sumažėja vandens sparno efektyvumas.

IŠVADOS

1. Išanalizavus mokslinių straipsnių tyrimus, matoma, kad nemažai tyrimų atlikta, siekiant sumažinti katamaranų išilginio supimosi amplitudes. Ši analizė rodo, kad sparnų naudojimas, kaip stabilizavimo priemonė yra viena iš efektyvių supimosi slopinimo būdų.
2. Išilginio supimosi problemai spręsti naudojamos įvairios priemonės ir metodai, tai gali būti skaičiavimai naudojant linijinę supimosi teoriją, matematiniai eksperimentai, naudojant skysčių dinamikos programą ir eksperimentai bandymų baseinuose.
3. Atlikti skaičiavimai panaudojant „*Excel*“ programą, kurioje skaičiavimai atliekami pagal liniję supimosi teoriją. Rezultatai parodė, kad su laivapriekiniais ir taip pat prijungus laivagalinius sparnus vertikalūs supimasis beveik nesikeičia, o kilinis supimasis keičiasi, iki bangos ilgio 50 m, kilinis supimasis mažėja traukiant sparną link midelio, o kai bangos ilgis virš 50 m – atvirkščiai, kuo toliau sparnas nuo midelio, tuo mažesnis supimasis ir tuo didesnis efektas. Bet jeigu pažiūrėti į supimosi kampus, tai su laivapriekiniais sparnais skirtumas siekia vos $0,1^\circ$, o pridėdant laivagalinius sparnus siekia $0,6^\circ$.
4. Darbo eigoje buvo suformuotas skaitinis eksperimentas naudojant „*FLOW-3D*“ programinę įrangą. Paskaičiuotas pirmas atvejis tik su laivapriekiniais sparnais ir antras atvejis su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais. Palyginus rezultatus su Žemaitytės A. darbe atliktu tyrimu, parodė, kad mūsų projektuojamų sparnų efektyvumas vertikaliajam supimuisi yra panašus, tačiau kilinio supimosi amplitudės pridėjus laivagalinius sparnus sumažėjo iki $0,2^\circ$.
5. Palyginus abiejų programų gautus rezultatus matome, kad supimosi kampų dydis skaičiuojant pagal linijinę supimosi teoriją sumažėja kampų dydis iki $0,6^\circ$, o atliekant eksperimentą „*FLOW-3D*“ programa amplitudės sumažėjo iki $0,2^\circ$, taigi abiejų skaičiavimų metodu gauti vertiklaus supimosi rezultatai sutampa, o kilinis supimasis skiriasi $0,4^\circ$.

REKOMENDACIJOS

Siūlyčiau pabandyti atlikti tolimesnius tyrimus padidinant laivapriekinių ir laivagalinių sparnų plotą. Taip pat būtų galima laivapriekinių sparnų plotą mažinti, o laivagalinių didinti ir atvirkščiai. Tačiau nėra jokio tikslo kelti laivapriekinių sparnų aukščiau, nes tyrimo metu neefektyviai dirbo, iškilo aukščiau vandens.

Norint pasitiksinti, kuri programa rodo tikslesnius rezultatus, reiktų atlikti eksperimentus bandymų baseine. Taip pat siūlyčiau SSD eksperimente prie sparnų kraštinių pridėti vandens srautą stabdančią juostą, tai turėtų padidinti sparnų veikimo efektyvumą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

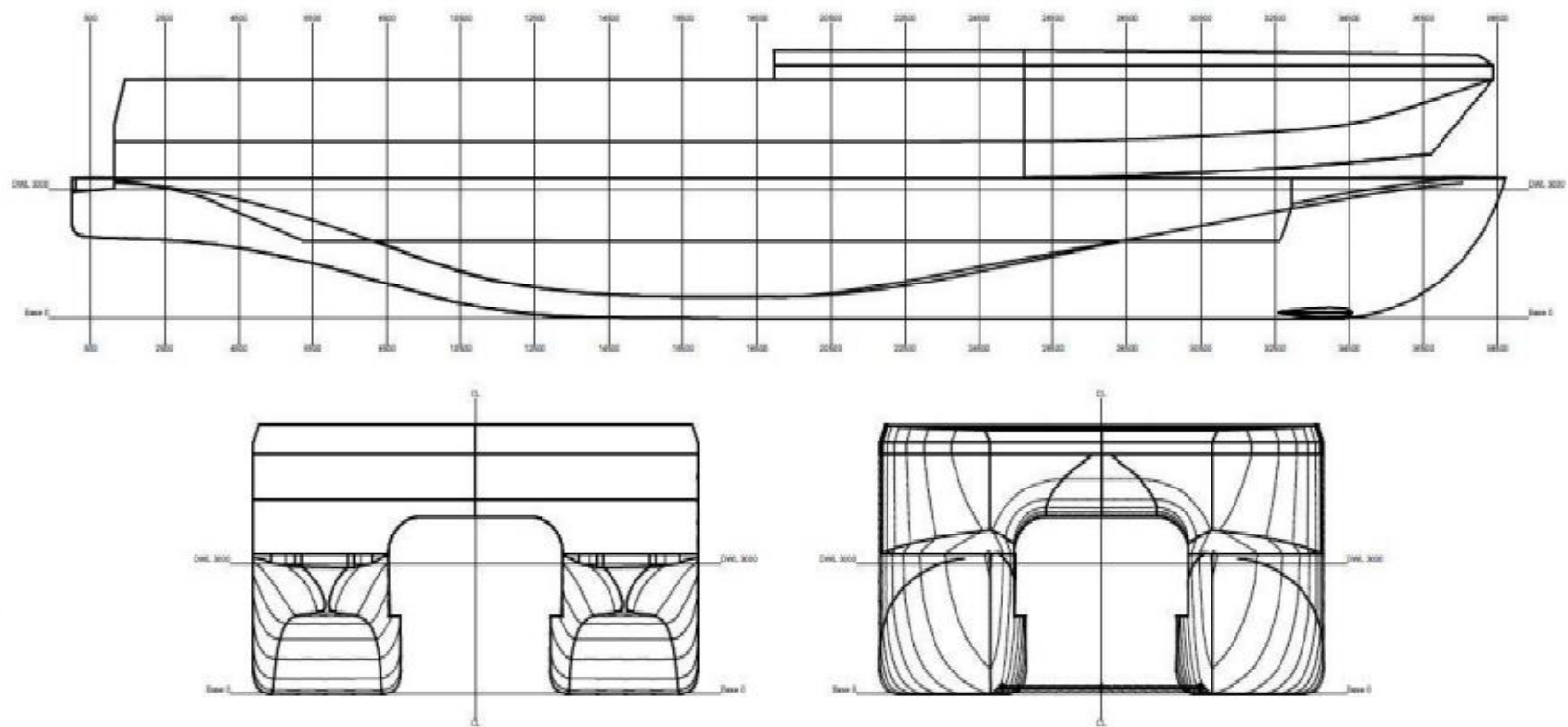
1. Belenky V. L., Sevastianov N. B. 2003. Stability and safety of ships. Oxford: Elsevier Ltd. The United Kingdom, Vol. 2, 432 p.
2. Bertram V. 2002. Practical Ship Hydrodynamics. Oxford: Linacre House, The United Kingdom, p. 270 p.
3. Biran A. B. Ship Hydrostatics and Stability. Oxford: Linacre House, The United Kingdom, p. 270 p. 180 p.
4. Bouscasse B., Broglia R., Stern F. 2012. „Eksperimentinis tyrimas apie greitųjų katamaranų išilginio supimosi bangavime“.
5. Djačkov V. 2005. Daktaro disertacija. Greitaeigių katamaranų išilginio supimosi stabilizavimo tyrimai. Kaipėda: Klaipėdos universitetas. 129 p.
6. Djačkov. V. 2004. Greitaeigių katamaranų išilginio supimosi problemos esant bangavimui. Klaipėda: Klaipėdos universitetas.
7. Dovydenas A. 2014. „Mokymo priemonė laivavedžiams“, projektas nr. VP1-2.2-ŠMM-04-V-03-022, 465 p.
8. 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.
9. Duan W., Han Y., Wang R., Huang L. 2016. A predictive controller for joint pitch – roll stabilization. Harbin: Harbin Engineering university.
10. D. Durante, R. Broglia, M. Diez, A. Olivieri, E.F. Campana, F. Stern. 2019. Accurate experimental benchmark study of a catamaran in regular and irregular head waves including uncertainty quantification.
11. Flow3D Documentation, 2012, p. 814.
12. Ghazi S. Bari, Konstantin I. Matveev. 2017. Hydrodynamics of single-deadrise hulls and their catamaran configurations. Ocean Engineering. Vol. 9, p. 305 – 314.
13. Indra Ranu Kusuma. 2017. Design and Simulation of Automatic Ballast System on Catamaran Ship Based on Programmable Logic Control. International Journal of Marine Engineering Innovation and Research.
14. J. Čerka. 2009. „Laivo hidroaeromechanika“, Klaipėdos universitetas, Klaipėda, 4 - 44 p.
15. J. M. Riola. 2016. Propulsive Qualities of Catamaran Vessels, p. 9 – 23.
16. Journée, et al., Kingdom, 2003, 344 p.
17. Thomas, G.A.; Davis, M.R.; Holloway, D.S.; Watson, N.L.; Roberts, T.J., 2003. Slamming Response of a Large High-Speed Wave-Piercer Catamaran. Marine Technology.
18. Kornev V., A method for wet spinning of alginate fibers with a high concentration of single-walled carbon nanotubes. Carbon. 2011.

19. 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.
20. Lengvinas K. 2017. KU mokslinių tyrimų laivo kilinio ir vertikalios supimosi tyrimas. Klaipėda: Klaipėdos universitetas.
21. Lubys D. 2016. KU mokslinių – tyrimų laivo kilinio ir vertikalios supimosi tyrimai naudojant CFD programinę įrangą. Klaipėda: Klaipėdos universitetas.
22. Žemaitytė A. 2018. KU tyrimų laivo kilinio ir vertikalios supimosi stabilizavimo įrenginio optimizavimo tyrimai. Klaipėda: Klaipėdos universitetas.
23. Merkys B. 2012. „Orlaivių konstrukcijos“. Vilnius: Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas.
24. M. Falchi, M. Felli, S. Grizzi, G. Aloisio, R. Broglia, F. Stern. 2014. SPIV measurements around the DELFT 372 catamaran in steady drift.
25. M. Taylan. 2001. Overall stability performance of alternative hull forms.
26. Ohkusu M., Faltinsen O. M. 1991. Prediction of Radiation Forces on a Catamaran at High Froude Number // Eighteenth Symposium on Naval Hydrodynamics. The National Academy of Sciences, p. 5–19. 14.
27. Papanikolaou A., Kaklis P., Koskinas C., Spanos D. 1997. Hydrodynamic Optimization of Fast Displacement Catamarans // Proceedings of Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, p. 697–714.
28. Roya Shademani, Parviz Ghadimi. 2017. Parametric investigation of the effects of deadrise angle and demi-hull separation on impact forces and spray characteristics of catamaran water entry.
29. R. B. Luhulima, D. Setyawan ir I.K.A.P. Utama. 2014. Selecting Monohull, Catamaran and Trimaran as Suitable Passenger Vessels Based on Stability and Seakeeping Criteria. The 14th International Ship Stability Workshop (ISSW), Kuala Lumpur, Malaysia, p. 262-266.
30. 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.
31. T. Katayama, M. Kotaki ir Y. Ikeda. 2011. A Study on the Characteristics of Roll Damping of Multi-hull Vessels.
32. Zhu D. X. 1998. Katory M. A time-domain prediction method of ship motions // Ocean Engineering. Vol. 25, Nr. 9, p. 781–791.
33. Холодилин А. Н., Шмырев А. Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. Ленинград: Судостроение, 1976, 328 с.
34. Алферьев М. Я., Мадорский Г. С. 1976. Транспортные катамараны внутреннего плавания. Москва: Транспорт, p. 336.
35. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. 1969. Качка судов на морском волнении. p. 432
36. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. 1982. Качка судов на морском волнении. p. 288.

37. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. 1976. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Ленинград: Судостроение, р. 176.
38. Батуев А. Д., Дубровский В. А. 1972. Особенности качки двухкорпусных судов // Судостроение. Ленинград, № 8, с. 12–17.
39. Дубровский В. А. Проблемы создания многокорпусных судов на международной конференции FAST'01 // Судостроение. Санкт-Петербург, 2002, № 1, с. 17–19.
40. Ремез Ю. В., Качка корабля. 1983.
41. Луговский В. В. Качка корабля. Санкт-Петербург: СПб МТУ, 1999, 425 р.
42. Мاستушкин Ю. М. 1972. О влиянии величины горизонтального клиренса на присоединенную инерцию катамарана. мореходные качества судов.
43. Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. Москва: Наука, 1980, 448 р.
44. Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Качка, 1969.
45. Холодилин А. Н., Шмырев А. Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. Ленинград: Судостроение, 1976, 328 с.
46. *Baltijos slėnis* [interaktyvus]. Balticvalley.lt [žiūrėta 2020 01 01]. Prieiga per internetą: http://balticvalley.lt/?page_id=1642
47. *Laivas „Mintis“* [interaktyvus]. Klaipėda, diena.lt [žiūrėta 2020 01 01]. Prieiga per internetą: <https://klaipeda.diena.lt/naujienos/klaipeda/miesto-pulsas/jurinems-inovacijoms-klaipedoje-nauja-nisa-665720>
48. *Mokslinių laivo „Mintis“ pristatymas* [interaktyvus]. Delfi [žiūrėta 2020 01 01]. Prieiga per internetą: <https://www.delfi.lt/projektai/archive/ivertins-didziausia-kada-nors-gresusia-ekologine-katastrofa-baltijos-juroje.d?id=65878166>
49. *„Mintis“* [interaktyvus]. Klaipėda, naujienos [žiūrėta 2020 01 01]. Prieiga per internetą: <https://www.ve.lt/naujienos/klaipeda1/klaipeda/laivas-mintis-atveria-lietuvai-juros-tyrimu-erdve-1272330/>

PRIEDAI

1 priedas. Laivo teorinis brėžinys.



2 priedas. 12,8 metrų atstumu, išilginio ir kilinio supimosi rezultatai su laivapriekiniais sparnais.

λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
σ_0	0,453277	0,473433	0,49654	0,523399	0,555149	0,593479	0,641031	0,702214	0,785099	0,906554	1,110298	1,241351	1,755535
σ_k	0,539566	0,567566	0,600087	0,638451	0,684582	0,741403	0,813609	0,909308	1,043966	1,251711	1,628032	1,888519	3,049871
ω_ζ	0,305345	0,32119	0,339594	0,361304	0,38741	0,419566	0,460427	0,514584	0,590788	0,708352	0,921315	1,068727	1,725944
ω_ψ	0,538428	0,566368	0,598821	0,637104	0,683138	0,739839	0,811892	0,907389	1,041763	1,249069	1,624597	1,884533	3,043435
ζ_0 , m	5,843436	5,39745	4,938978	4,466324	3,977276	3,468729	2,935902	2,370923	1,760866	1,078771	0,329689	0,201166	0,023499
ζ_0/r	0,953693	0,940308	0,924194	0,904471	0,879821	0,848151	0,80585	0,746133	0,6551	0,497983	0,20628	0,148796	0,029232
γ_3 laipsn.	6,863381	7,254228	7,690508	8,181206	8,739729	9,387744	10,1606	11,10171	12,27012	13,59776	0,486391	317,8378	222,361
Ψ_0 laipsn.	13,6929	13,11204	12,51786	11,90443	11,26243	10,57757	9,828267	8,98051	7,987938	6,778017	4,918025	3,484103	0,084157
ψ_0/α_0	1,862183	1,744817	1,626529	1,50661	1,384	1,257164	1,123948	0,98124	0,825432	0,6518	0,427346	0,286321	0,005816
γ_5 laipsn.	56,01711	59,59806	63,64382	68,22996	73,44413	79,38851	86,18725	93,99534	103,182	115,2261	139,8718	169,9903	44,64719
ζ_1	5,801567	5,354253	4,894561	4,420877	3,931102	3,42228	2,889865	2,326562	1,720647	1,048538	0,329677	0,149121	-0,01736
ζ_2	-0,69825	-0,6815	-0,6609	-0,63553	-0,60429	-0,56576	-0,51788	-0,45649	-0,37419	-0,25361	-0,0028	0,135021	0,015833
ψ_1	7,654399	6,636383	5,558223	4,416111	3,21025	1,948905	0,654626	-0,62671	-1,82237	-2,88925	-3,76051	-3,43108	0,059876
ψ_2	-11,3537	-11,3086	-11,2162	-11,055	-10,7952	-10,3965	-9,80644	-8,95862	-7,77728	-6,13138	-3,16947	-0,60555	-0,05914
r_0	6,127169	5,740087	5,344092	4,938054	4,520552	4,089757	3,643237	3,177616	2,687936	2,166281	1,598256	1,35196	0,80388

3 priedas. 14,8 metrų atstumu, išilginio ir kilinio supimosi rezultatai su laivapriekiniais sparnais.

λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
σ_0	0,453277	0,473433	0,49654	0,523399	0,555149	0,593479	0,641031	0,702214	0,785099	0,906554	1,110298	1,241351	1,755535
σ_k	0,539566	0,567566	0,600087	0,638451	0,684582	0,741403	0,813609	0,909308	1,043966	1,251711	1,628032	1,888519	3,049871
ω_ζ	0,305345	0,32119	0,339594	0,361304	0,38741	0,419566	0,460427	0,514584	0,590788	0,708352	0,921315	1,068727	1,725944
ω_ψ	0,538428	0,566368	0,598821	0,637104	0,683138	0,739839	0,811892	0,907389	1,041763	1,249069	1,624597	1,884533	3,043435
ζ_0 , m	5,836822	5,390956	4,932673	4,460294	3,971628	3,463592	2,931433	2,367329	1,758389	1,077709	0,327801	0,189128	0,016304
ζ_0/r	0,952613	0,939177	0,923014	0,903249	0,878572	0,846894	0,804623	0,745002	0,654178	0,497493	0,205099	0,139892	0,020282
γ_3 laipsn.	6,860612	7,246177	7,675998	8,158812	8,707747	9,344174	10,10323	11,02922	12,18801	13,5543	1,580925	318,4105	194,5415
Ψ_0 laipsn.	13,58639	12,99884	12,39768	11,77709	11,12807	10,43697	9,683415	8,835947	7,854071	6,681778	4,950411	3,614913	0,188783
ψ_0/α_0	1,847697	1,729754	1,610913	1,490493	1,367489	1,240453	1,107383	0,965444	0,811599	0,642546	0,43016	0,29707	0,013046
γ_5 laipsn.	56,59728	60,21338	64,3	68,93403	74,20497	80,21773	87,10088	95,01714	104,355	116,6625	141,8981	172,008	85,50586
ζ_1	5,795035	5,347907	4,888479	4,415155	3,925855	3,41764	2,885983	2,32361	1,718761	1,047697	0,327677	0,141459	-0,01578
ζ_2	-0,69718	-0,67993	-0,65881	-0,63295	-0,60124	-0,56232	-0,5142	-0,45286	-0,3712	-0,25256	-0,00904	0,125534	0,004093
ψ_1	7,480407	6,458324	5,377289	4,234161	3,030047	1,774349	0,490847	-0,7737	-1,94799	-2,99883	-3,8957	-3,57981	0,014813
ψ_2	-11,3417	-11,281	-11,1708	-10,9896	-10,7076	-10,285	-9,67097	-8,80201	-7,60866	-5,97103	-3,05452	-0,50256	-0,1882
r_0	6,127169	5,740087	5,344092	4,938054	4,520552	4,089757	3,643237	3,177616	2,687936	2,166281	1,598256	1,35196	0,80388

4 priedas. 16,8 metrų atstumu, išilginio ir kilinio supimosi rezultatai su laivapriekiniais sparnais.

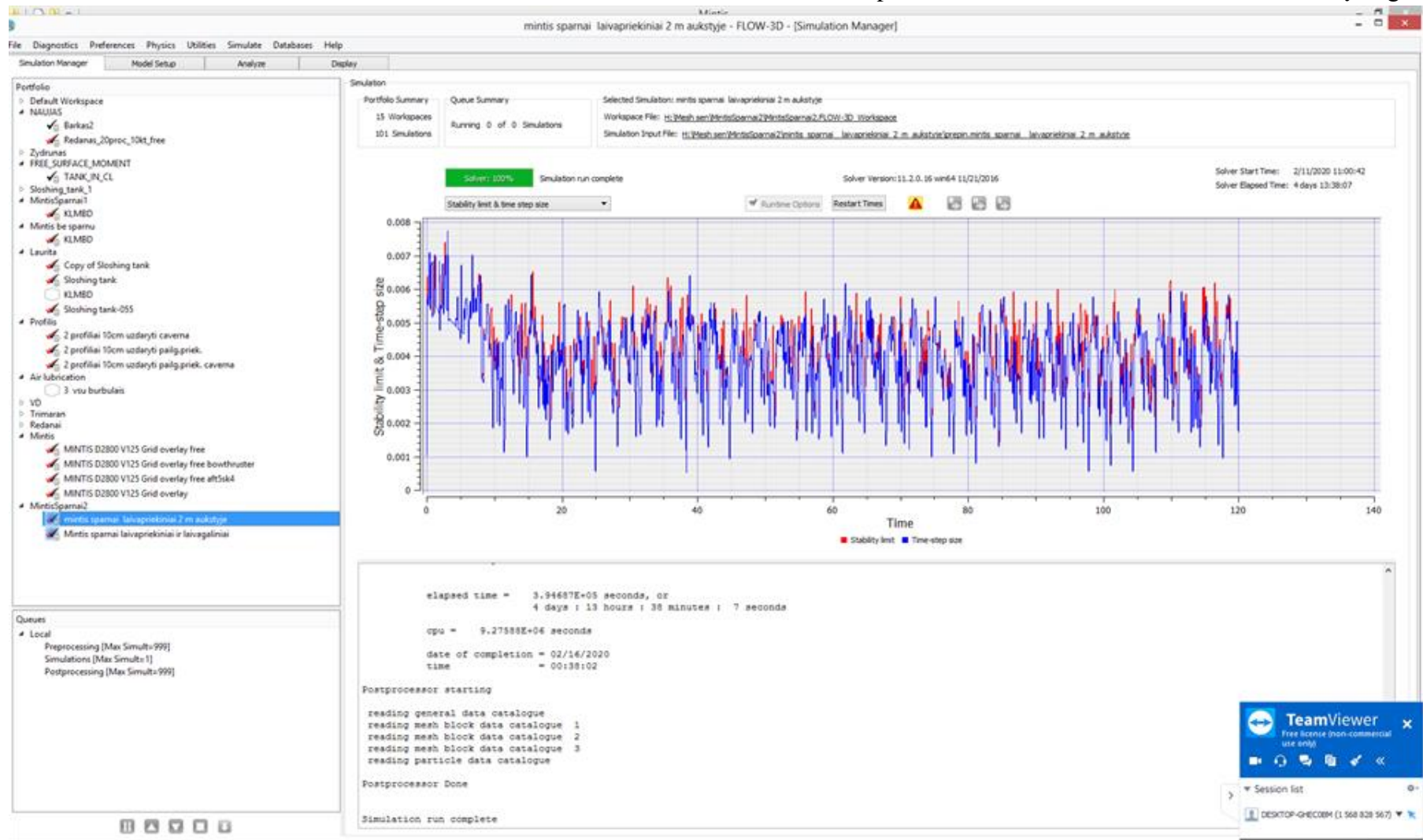
λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
σ_0	0,453277	0,473433	0,49654	0,523399	0,555149	0,593479	0,641031	0,702214	0,785099	0,906554	1,110298	1,241351	1,755535
σ_k	0,539566	0,567566	0,600087	0,638451	0,684582	0,741403	0,813609	0,909308	1,043966	1,251711	1,628032	1,888519	3,049871
ω_ζ	0,305345	0,32119	0,339594	0,361304	0,38741	0,419566	0,460427	0,514584	0,590788	0,708352	0,921315	1,068727	1,725944
ω_ψ	0,538428	0,566368	0,598821	0,637104	0,683138	0,739839	0,811892	0,907389	1,041763	1,249069	1,624597	1,884533	3,043435
ζ_0 , m	5,830587	5,384924	4,926926	4,454935	3,96678	3,459402	2,928075	2,365031	1,757423	1,078454	0,328169	0,179103	0,008376
ζ_0/r	0,951596	0,938126	0,921939	0,902164	0,877499	0,84587	0,803702	0,744279	0,653819	0,497836	0,20533	0,132477	0,010419
γ_3 laipsn.	6,854536	7,234707	7,658081	8,133251	8,673245	9,299464	10,04744	10,96371	12,12446	13,5595	2,951261	319,9862	155,5516
ψ_0 laipsn.	13,47053	12,87647	12,26864	11,64145	10,98634	10,29046	9,535014	8,691679	7,726991	6,60381	5,01251	3,744882	0,336379
ψ_0/α_0	1,831941	1,713471	1,594146	1,473328	1,350073	1,22304	1,090412	0,949681	0,798467	0,635048	0,435556	0,307751	0,023245
γ_5 laipsn.	57,24735	60,90431	65,03867	69,729	75,06713	81,16125	88,14502	96,18907	105,6976	118,257	143,7048	172,8877	78,95155
ζ_1	5,788918	5,342059	4,882989	4,410132	3,921424	3,413942	2,883176	2,321871	1,718227	1,048398	0,327734	0,137179	-0,00762
ζ_2	-0,69582	-0,6781	-0,65652	-0,63022	-0,59814	-0,55898	-0,5108	-0,44977	-0,3691	-0,25283	-0,0169	0,115151	-0,00347
ψ_1	7,288569	6,262318	5,178377	4,034287	2,832065	1,582233	0,309726	-0,93798	-2,09132	-3,12688	-4,04011	-3,71607	0,064497
ψ_2	-11,3284	-11,2511	-11,1222	-10,9201	-10,615	-10,1681	-9,52998	-8,64092	-7,4386	-5,81661	-2,96695	-0,46364	-0,33014
r_0	6,127169	5,740087	5,344092	4,938054	4,520552	4,089757	3,643237	3,177616	2,687936	2,166281	1,598256	1,35196	0,80388

5 priedas. 12,8 metrų atstumu, išilginio ir kilinio supimosi rezultatai su laivapriekiniais ir laivagaliniais sparnais.

λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
λ , m	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50	40	20
σ_0	0,453277	0,473432525	0,49654	0,523399	0,555149	0,593479	0,641031	0,702214	0,785099	0,906554	1,110298	1,241351	1,755535
σ_k	0,539566	0,567566065	0,600087	0,638451	0,684582	0,741403	0,813609	0,909308	1,043966	1,251711	1,628032	1,888519	3,049871
ω_ζ	0,305345	0,321189827	0,339594	0,361304	0,38741	0,419566	0,460427	0,514584	0,590788	0,708352	0,921315	1,068727	1,725944
ω_ψ	0,538428	0,566368335	0,598821	0,637104	0,683138	0,739839	0,811892	0,907389	1,041763	1,249069	1,624597	1,884533	3,043435
ζ_0 , m	5,882936	5,435683603	4,976332	4,503248	4,014274	3,50634	2,974698	2,411439	1,802986	1,120848	0,310189	0,057637	0,054645
ζ_0/r	0,960139	0,946968916	0,931184	0,911948	0,888005	0,857347	0,816499	0,758883	0,67077	0,517406	0,19408	0,042632	0,067976
γ_3 , laipsn.	7,392122	7,826790818	8,320551	8,88972	9,56024	10,37641	11,41858	12,83791	15,00979	19,28497	33,6024	206,3836	256,6069
Ψ_0 , laipsn.	13,19669	12,59502376	11,97667	11,33495	10,65961	9,935033	9,137764	8,23178	7,166743	5,860376	3,882197	2,560985	0,348482
ψ_0/α_0	1,794701	1,676018271	1,556207	1,434537	1,309922	1,180797	1,044983	0,899431	0,740574	0,563556	0,337339	0,21046	0,024082
γ_5 , laipsn.	59,40796	63,21471061	67,52729	72,43382	78,04069	84,47977	91,91329	100,6354	111,2025	125,8174	158,1848	195,114	129,2676
ζ_1	5,834049	5,385053708	4,923958	4,449161	3,95853	3,449004	2,915828	2,351168	1,74148	1,057964	0,258364	-0,051634	-0,01266
ζ_2	-0,75684	-0,74017079	-0,72008	-0,69585	-0,66666	-0,631495	-0,588874	-0,535768	-0,466911	-0,370153	-0,171656	0,025611	0,053157
ψ_1	6,716952	5,67684044	4,578962	3,421976	2,2099	0,956796	-0,306116	-1,520073	-2,592549	-3,429844	-3,604223	-2,47241	-0,22059
ψ_2	-11,3594	-11,243136	-11,0668	-10,80607	-10,42803	-9,888854	-9,132635	-8,090215	-6,681385	-4,75186	-1,442577	0,667706	-0,26978
r_0	6,127169	5,74008662	5,344092	4,938054	4,520552	4,089757	3,643237	3,177616	2,687936	2,166281	1,598256	1,35196	0,80388

<input checked="" type="checkbox"/> Mesh block 1: 1 tinklas		<input type="text" value="1 tinklas"/>
Name		1 tinklas
Mesh Type		Non-conforming
Overlap length		<input type="text"/> m
Components		Conform To
Meshing component		No meshing components
Mesh Cells		Use cell size
Size of Cells		0.5 m
Total Cells		<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Shallow water mesh block		
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh block 2: 2 tinklas		<input type="text" value="2 tinklas"/>
Name		2 tinklas
Mesh Type		Non-conforming
Overlap length		<input type="text"/> m
Components		Conform To
Meshing component		No meshing components
Mesh Cells		Use cell size
Size of Cells		0.2 m
Total Cells		<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Shallow water mesh block		
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh block 3: tinklas 3		<input type="text" value="tinklas 3"/>
Name		tinklas 3
Mesh Type		Non-conforming
Overlap length		<input type="text"/> m
Components		Conform To
Meshing component		No meshing components
Mesh Cells		Use cell size
Size of Cells		0.1 m
Total Cells		1000
<input type="checkbox"/> Shallow water mesh block		
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh block 4: tinklas 4		<input type="text" value="tinklas 4"/>
Name		tinklas 4
Mesh Type		Non-conforming
Overlap length		<input type="text"/> m
Components		Conform To
Meshing component		No meshing components
Mesh Cells		Use cell size
Size of Cells		0.1 m
Total Cells		1000

7 priedas. „FLOW – 3D“ modeliavimo rezultatų langas.



8 priedas. FLOW 3D skaičiavimų rezultatai.

t, s	Be sparno	Žemaitytė A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2	Žemaitytė A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2
	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.
1	4,926	4,925	4,929	4,925	-1,425	-1,490	-1,415
2,1	4,925	4,930	4,930	4,930	-1,496	-1,490	-1,490
3,1	4,951	4,961	4,957	4,958	-0,267	-0,229	-0,286
4	4,968	4,971	4,97	4,97	0,149	0,115	0,172
5	5,098	5,086	5,092	5,089	-0,003	-0,057	0,029
6	5,320	5,310	5,316	5,310	0,560	0,516	0,567
7	5,387	5,387	5,389	5,388	2,020	1,994	2,005
8,1	5,24	5,294	5,251	5,296	2,556	2,808	2,464
9	5,472	5,575	5,492	5,578	0,244	0,7449	0,287
10	6,147	6,176	6,117	6,178	-0,637	-0,229	-0,630
11	6,105	6,012	6,05	5,945	3,174	2,979	3,209
12,1	5,726	5,711	5,769	5,709	1,935	1,203	1,375
13	5,826	5,855	5,883	5,858	-3,024	-3,266	-3,037
14,1	5,964	5,92	5,983	5,939	-3,133	-2,578	-2,636
15	5,573	5,451	5,568	5,546	0,467	0,630	0,573
16	5,505	5,367	5,478	5,512	-1,946	-1,833	-0,018
17,1	5,596	5,514	5,57	5,592	-3,531	-2,979	-3,037
18	5,444	5,464	5,452	5,436	1,271	1,834	1,432
19,1	5,274	5,377	5,317	5,313	1,605	0,859	1,031
20,1	5,385	5,355	5,407	5,408	-1,566	-1,662	-1,318
21,1	5,544	5,543	5,542	5,569	1,040	1,432	1,547
22,1	5,443	5,505	5,441	5,457	2,334	1,776	1,261
23	5,562	5,578	5,561	5,574	-2,044	-1,948	-2,12
24	5,895	5,883	5,893	5,886	-1,602	-1,547	-1,547
25	5,588	5,608	5,624	5,594	1,918	1,834	1,949
26	5,625	5,638	5,642	5,639	-1,364	-1,547	-1,318
27	5,925	5,900	5,91	5,926	-3,195	-3,266	-3,037
28,1	5,826	5,827	5,818	5,822	1,071	1,490	1,432
29,1	5,693	5,708	5,701	5,695	0,758	0,229	0,289
30	5,731	5,704	5,725	5,781	-2,049	-2,120	-2,063
31,1	5,909	5,854	5,883	5,791	1,025	0,917	1,948
32	5,703	5,705	5,781	5,657	2,623	2,464	2,808
33,1	5,651	5,668	5,669	5,693	-0,901	-1,203	-1,089
34,1	5,922	5,923	5,919	5,933	-0,258	0,172	0,229
35	5,648	5,691	5,679	5,824	3,217	2,922	3,151
36	5,592	5,594	5,592	5,591	-0,171	-0,344	-0,172
37,1	5,843	5,798	5,845	5,794	-2,363	-2,349	-2,12
38,1	5,642	5,654	5,661	5,646	1,079	1,3178	1,375
39,1	5,602	5,645	5,607	5,642	0,275	-0,172	-0,115
40	5,651	5,662	5,656	5,684	-2,575	-2,578	-2,521
41	5,682	5,651	5,669	5,673	0,157	-0,229	-2,464

9 priedas. FLOW 3D skaičiavimų rezultatai (tęsinys).

t, s	Be sparno	Žemaitytės A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2	Žemaitytės A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2
	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.
42	5,531	5,538	5,549	5,542	1,274	1,089	1,146
43	5,523	5,551	5,554	5,549	-1,635	-1,835	-1,662
44	5,682	5,681	5,69	5,688	-1,120	0,745	-1,031
45	5,456	5,475	5,482	5,575	2,085	2,005	2,063
46,1	5,482	5,487	5,475	5,491	-0,686	-1,203	-1,031
47,1	5,658	5,634	5,641	5,633	-2,236	-1,891	-1,833
48	5,392	5,420	5,409	5,402	1,731	1,547	1,604
49	5,321	5,340	5,334	5,339	0,416	0,057	0,287
50	5,445	5,393	5,441	5,429	-2,359	-2,521	-2,292
51	5,481	5,450	5,456	5,453	0,680	0,630	0,688
52	5,346	5,373	5,352	5,354	1,460	1,375	0,745
53	5,365	5,375	5,391	5,38	-1,611	-1,547	-1,604
54,1	5,571	5,574	5,583	5,566	0,024	0,458	0,578
55	5,448	5,477	5,47	5,454	2,635	2,406	2,521
56,1	5,495	5,521	5,561	5,517	-0,550	-1,031	-0,974
57,1	5,749	5,749	5,759	5,757	-1,208	-0,917	-0,859
58	5,533	5,554	5,553	5,562	2,569	2,406	2,521
59,1	5,565	5,561	5,541	5,564	0,586	-0,344	-0,229
60,1	5,737	5,696	5,708	5,705	-2,294	-2,292	-2,292
61,1	5,530	5,518	5,538	5,52	1,059	1,433	1,432
62,1	5,441	5,448	5,454	5,453	0,907	0,573	0,516
63,1	5,507	5,501	5,496	5,517	-2,164	-2,464	-2,349
64,1	5,557	5,566	5,545	5,567	-0,272	0,229	0,229
65	5,378	5,410	5,406	5,405	2,085	1,891	2,063
66,1	5,391	5,381	5,404	5,387	-0,891	-1,490	-1,146
67	5,592	5,577	5,597	5,58	-1,187	-1,203	-1,203
68	5,383	5,413	5,406	5,41	2,512	2,636	2,275
69	5,424	5,471	5,437	5,478	0,023	0,057	-0,172
70	5,619	5,628	5,635	5,642	-2,217	-2,235	-2,235
71	5,506	5,513	5,581	5,504	1,444	1,432	1,432
72	5,464	5,472	5,464	5,455	0,761	0,630	0,573
73	5,561	5,543	5,552	5,554	-2,360	-2,636	-2,464
74	5,606	5,606	5,603	5,606	-0,040	-0,012	0,057
75	5,403	5,451	5,426	5,422	1,679	1,604	1,662
76,1	5,454	5,470	5,449	5,454	-1,489	-1,833	-1,776
77,1	5,672	5,660	5,651	5,661	-1,136	-0,573	-0,688
78	5,454	5,468	5,475	5,467	2,578	2,521	2,521
79	5,426	5,444	5,457	5,440	-0,116	-0,172	-0,172
80	5,660	5,661	5,670	5,660	-1,843	-1,776	-1,891

10 priedas. FLOW 3D skaičiavimų rezultatai (tęsinys).

t, s	Be sparno	Žemaitytės A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2	Žemaitytės A.	Tyrimo atvejis 1	Tyrimo atvejis 2
	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ξ , m	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.	ψ , laipsn.
81	5,561	5,591	5,564	5,595	2,022	2,177	1,662
82	5,518	5,533	5,51	5,536	0,865	0,859	0,859
83,1	5,680	5,655	5,662	5,678	-2,319	-2,235	-2,120
84,1	5,670	5,653	5,67	5,660	0,537	1,031	0,974
85	5,518	5,534	5,546	5,521	1,775	1,662	1,662
86	5,537	5,553	5,557	5,555	-1,606	-1,776	-1,662
87	5,748	5,742	5,738	5,745	-1,078	-1,089	-1,031
88	5,515	5,526	5,521	5,526	2,222	2,235	2,292
89	5,528	5,525	5,515	5,524	-0,550	-0,516	-0,516
90,1	5,724	5,713	5,717	5,715	-2,073	-1,719	-1,776
91	5,527	5,544	5,554	5,541	1,815	1,834	1,833
92,1	5,495	5,507	5,511	5,509	0,598	0,115	0,172
93	5,603	5,595	5,623	5,618	-2,269	-2,349	-2,177
94,1	5,588	5,596	5,589	5,597	0,553	1,203	1,089
95,1	5,483	5,501	5,471	5,475	1,456	1,261	1,146
96,1	5,537	5,518	5,510	5,520	-1,790	-2,005	-1,948
97	5,690	5,657	5,666	5,684	-0,759	-0,688	-0,859
98	5,445	5,461	5,481	5,468	2,288	2,120	2,063
99,1	5,461	5,476	5,494	5,487	-0,621	-1,203	-1,146
100	5,688	5,676	5,685	5,689	-1,785	-1,811	-1,776
101,1	5,474	5,509	5,487	5,515	1,995	2,349	2,177