

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Martynas SIMUTIS

RACIONALUS VILKIKŲ PANAUDOJIMAS
SUDĖTINGOMIS NAVIGACINĖMIS SĄLYGOMIS
LAIVYBOS SAUGUMUI UOSTUOSE GERINTI

MOKSLO DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ SRITIS
TRANSPORTO INŽINERIJOS MOKSLO KRYPTIS (T 003)

Klaipėda, 2025

Disertacija rengta 2020–2025 metais Klaipėdos universitete.

Mokslinis vadovas

Prof. habil. dr. Vytautas PAULAUSKAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Disertacija ginama Klaipėdos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryboje:

Pirmininkas

Prof. dr. Olegas PRENTKOVSKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Nariai:

Prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003);
Dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003);
Dr. Jūratė KRIAUCIŪNIENĖ (Lietuvos energetikos institutas, aplinkos inžinerija – T 004);
Habil. dr. Ludmiła FILINA-DAVIDOWICZ (Vakarų Pamario technologijos universitetas Ščecine, Lenkija, transporto inžinerija – T 003).

Disertacija ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties gynimo tarybos posėdyje, kuris įvyks 2025 m. vasario 20 dieną, 13 val., Klaipėdos universiteto Aula Magna korpuso konferencijų salėje.

Adresas: Herkaus Manto g. 90–2, LT-92295 Klaipėda, Lietuva.

Tel.: (8 46) 398 936; faks.: (8 46) 398 999; el. p.: mokslas@ku.lt

Pranešimai apie disertacijos gynimą, nurodant internetinės svetainės adresą, kurioje pateikiama disertacija, išsiųsti 2025 m. sausio 20 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje, adresu <https://www.ku.lt/mokslas/doktorantura/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (Herkaus Manto g. 84, LT-92294 Klaipėda, Lietuva), Vytauto Didžiojo universiteto (Studentų g. 11–146, Akademija, LT-53361 Kauno raj., Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

© Martynas Simutis, 2025

© Klaipėdos universiteto leidykla, 2025

KLAIPĖDA UNIVERSITY

Martynas SIMUTIS

RESEARCH ON THE RATIONAL
USE OF TUGS IN DIFFICULT NAVIGATION
CONDITIONS, INCREASING SHIPPING
SAFETY IN PORTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
FIELD OF TRANSPORT ENGINEERING (T 003)

Klaipėda, 2025

The dissertation was prepared at Klaipėda University from 2020 to 2025.

Scientific Supervisor

Prof. habil. Dr. Vytautas PAULAUSKAS (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003).

The dissertation is defended at the Dissertation Defense Council of Klaipėda University in the Field of Transport Engineering:

Chairman

Prof. Dr. Olegas PRENTKOVSKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003).

Members:

Prof. Habil. Dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003);
Dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003);
Dr. Jūratė KRIAUCIŪNIENĖ (Lithuanian Energy Institute, Environmental Engineering – T 004);
Dr. Habil. Ludmiła Filina-Dawidowicz (West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland, Transport Engineering – T 003).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Transport Engineering scientific field defense council, which will take place on February 20, 2025 at 1 PM in the conference hall of the Aula Magna building at Klaipėda University.

Address: Herkaus Manto g. 90–2, LT-92295 Klaipėda, Lithuania.

Tel.: (8 46) 398 936; Fax: (8 46) 398 999; E-mail: mokslas@ku.lt

Notifications regarding the dissertation defense, specifying the website address where the dissertation is available, will be sent on January 20, 2025.

The dissertation can be reviewed on the website at <https://www.ku.lt/mokslas/doktorantura/> and at the libraries of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), Klaipėda University (Herkaus Manto str. 84, LT-92294 Klaipėda, Lithuania), Vytautas Magnus University (Studentų str. 11–146, Akademija, LT-53361 Kaunas district, Lithuania), and Kaunas University of Technology (K. Donelaičio str. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

© Martynas Simutis, 2025

© Klaipėda University Press, 2025

PADĖKA

Šį darbą skiriu savo žmonai Agnei ir dukrytei Mėtai, kaip kompensaciją už joms neskirtą laiką ir begalinį palaikymą rengiant šį darbą.

Už savo gyvenimo pasiekimą, tai, kur esu šiandien, parašęs šį darbą, dėkoju savo tėvams Petrui ir Vidai. Jų tikėjimas mokslo šviesa švietė ryškiau nei švyturys ir buvo paskata siekti mokslo aukštumų nesvyruojant.

Ypatingą padėką skiriu savo mokslinio darbo vadovui prof. habil. dr. Vytautui Paulauskui, kuris profesionaliai ir kantriai vedė mane per audringus doktorantūros studijų vandenį bei verpetus.

Dėkoju savo universiteto kolegoms ir Inžinerijos katedros darbuotojams už didžiulį palaikymą ir motyvaciją sunkiais momentais, ypač Audriui Seniuliui, Artūriui Tadžijevui, Valentinui Kartašovui, Mariui Vasyliui.

Ačiū recenzentams, kurie negailėjo savo laiko ir pastangų, už jų vertingas pastabas gerinant šį darbą:

Prof. dr. Jolantai Janutienei, prof. habil. dr. Sergejui Lebedevui, prof. dr. Laurencui Raslavičiui.

Dėkoju ir savo darbovietės UAB „Gitana“ vadovams, kurie šiame mano kelyje buvo kantrūs ir supratingi. Ypatingai dėkoju Tomui Bružui už jo begalinį palaikymą einant šiuo mokslo keliu.

Dėkoju įmonei „Klasco“, kuri suteikė galimybę atlikti praktiką ir pasisemti žinių, ypač Gediminui Rubiui ir jo komandai.

Didžiulis ačiū visiems, kurių nepaminėjau, bet sutikau šioje nelengvoje kelionėje, jų palaikymas sunkiu momentu, vertinga pastaba prisidėjo rašant šį darbą.

Galiausiai dėkoju Lietuvos valstybei ir jos žmonėms, džiaugiuosi, kad gimiau ir užaugau šalyje, kurioje mokslas yra didelis prioritetas.

I would like to say big thanks for Genova University DITEN colleagues which takes special place in my whole journey. Specialy thanks for professor Benedetto Piaggio. Time we spend in Genova was always in my hart and big help and support allways remains big frienship.

Santrauka

Disertacijoje nagrinėjami navigacinio saugumo veiksniai, kai vilkikai padeda laivams manevruoti uoste, švartuotis arba atšvartuoti veikiant išorinėms vėjo, srovės jėgoms ir sekliajam vandens efektui. Disertacinio darbo kontekste navigacinis saugumas vertinamas kaip laivo valdomumas vykdant laivų švartavimo operacijas uoste pasitelkus vilkikų pagalbą. Intensyvėjant laivybai ir uostams priimant vis daugiau ir didesnių gabaritų įvairių tipų laivų svarbu tiksliai įvertinti būtiną uosto vilkiko traukos jėgą, atsižvelgiant į veikiančias išorines jėgas, kad sklandžiai galėtų atlikti jam patikėtas švartavimo, atšvartavimo ar manevravimo operacijas, siekiant užtikrinti uosto navigacinį saugumą. Šio darbo tyrimo objektas – vilkikas ir laivą veikiančios išorinės bei vidinės jėgos, kurias būtina kompensuoti siekiant saugiai atlikti vilkimo operaciją esant įvairioms meteorologinėms ir hidrologinėms sąlygoms. Tik tiksliai įvertinus veikiančias išorines ir vidines jėgas galima nustatyti vilkimo operacijai būtiną vilkikų traukos jėgą. Disertacijoje sprendžiami uždaviniai: būtinos vilkikų traukos jėgos skaičiavimas, įvertinant meteorologinius ir hidrologinius parametrus, tokius kaip vėjo jėga ir kryptis, srovės greitis ir kryptis, sekliojo vandens efektas, siekiant užtikrinti navigacinį saugumą uoste vykdant įvairias vilkimo operacijas. Darbe atliekami simuliaciniai ir eksperimentiniai vilkimo operacijos tyrimai, kurių rezultatų pagrindu parengta vilkikų traukos jėgos skaičiavimo metodika, kurią taikant galima apskaičiuoti būtiną vilkikų traukos jėgą, įvertinus laivą veikiančias išorines sąlygas ir jo gabaritus. Mokslinis disertacijos naujumas pagrįstas vilkikų ir laivo manevrinių savybių tyrimu, o disertacijos praktinę vertę patvirtina parengti vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos uostuose metodiniai pagrindai, leisiantys tiksliau įvertinti vilkikų naudojimo veiksmingumą, siekiant saugiai plukdyti laivus uostų kanalais ir užtikrinti jų švartavimo operacijų, esant nestandartinėms ar ribinėms situacijoms, saugumą. Be to, sukurti metodiniai vilkikų naudojimo ir vilkimo lynų įtempimo, vykdant vilkimo operacijas uoste, metodika leidžia racionaliau panaudoti vilkikus gerinant uoste navigacinį laivybos saugumą.

Disertaciją sudaro: įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų bei konferencijų sąrašas disertacijos tema, santrauka anglų kalba.

Darbo įvade aprašomas darbo aktualumas, formuluojama tyrimo problema, aptariamas naujumas.

Pirmame skyriuje pateikiama problemos analizė, apžvelgiami išanalizuoti Lietuvos ir užsienio mokslininkų atlikti tyrimai. Pabaigoje skyrius apibendrinamas, formuluojamos išvados, aptariami šiandieninių metodikų trūkumai ir apibrėžiami tyrimų aspektai, siekiant papildyti šias metodikas originaliais autoriaus sprendimais.

Antrame skyriuje pagrindžiama vilkiko ir laivo teorija, sudarytas matematinis modelis leidžia aprašyti vilkikų darbą, kai atliekant vilkimo operaciją būtina įvertinti laivą veikiančias išorines ir vidines jėgas bei momentus. Pabaigoje skyrius apibendrinamas ir formuluojamos išvados, pateikiant pasiūlymų, kaip praplėstas ir papildytas matematinis modelis gali pagerinti navigacinę saugumą vilkikams uoste vykdant vilkimo operacijas.

Trečiame skyriuje aptariamos simuliacinių ir praktinių eksperimentų priemonės, pateikiama eksperimentų atlikimo metodika.

Aprašoma eksperimentuose naudojama tyrimų įranga. Pabaigoje skyrius apibendrinamas ir formuluojamos išvados išgryninant autoriaus siūlomus sprendimus ir tai, kaip juos naudojant bus įgyvendinti darbe keliami tikslai.

Ketvirtame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai, rekomendacijos ir vertinimai. Pabaigoje skyrius apibendrinamas ir formuluojamos išvados įvertinus gautus rezultatus, jų atitikimą iškeltiems uždaviniams, aptariama tyrimo praktinė reikšmė.

Disertacijos tema disertacijos autoriaus publikuoti trys straipsniai tarptautiniuose žurnaluose, kurie įraukti į *Web of Science* duomenų bazę ir turi *impact* faktorių. Disertacijos autoriaus atliktų tyrimų rezultatai pristatyti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The thesis examines the influence of tugboats on the navigational safety of the port, when tugboats help ships to maneuver in the port, moor or unmoor under the influence of external wind, current forces and shallow water effect. With the intensification of shipping, and ports receiving ever larger quantities and larger sizes of various types of ships, it is necessary to accurately estimate the required power of port tugboats by assessing the external forces acting on them, so that tugboats can carry out assigned mooring, mooring or maneuvering operations while ensuring the navigational safety of ports. The research object of this work is the tow truck and the acting external and internal forces that need to be compensated for a safe towing operation under various meteorological and hydrological conditions. It is by accurately assessing the acting external and internal forces that it is possible to determine the power of tractors required for the towing operation. The dissertation addresses the following issues: calculations of the required power of tugboats, simulation and experimental studies of the towing operation. On the basis of these studies, a methodology for calculating the power of tugboats has been developed, on the basis of which it is possible to calculate the required power of tugboats after evaluating the external working conditions and the dimensions of the ship.

The dissertation consists of: introduction, four chapters, summary of conclusions and results, bibliography and list of the author's publications and conferences on the topic of the dissertation.

The introduction of the work describes the relevance of the work, the research problem, novelty.

The first chapter presents an analysis of the problem, reviewed and analyzed the research conducted by Lithuanian and foreign scientists. At the end of the chapter, a summary of the chapter and conclusions are formed.

The second chapter is devoted to theoretical justification, and mathematical models are devoted to the description of the work of tractors. During the towing operation, it is necessary to evaluate the various external and internal forces and moments. At the end of the chapter, a summary and conclusions are formed.

The third chapter presents the procedure of simulation and practical experiments, tools and methodology of conducting experiments. The research equipment used in the experiments is described. A summary and conclusions are formed at the end of the chapter.

The fourth chapter presents the research results, recommendations and evaluations. At the end of the chapter, a summary and conclusions are presented

3 articles have been published on the subject of the dissertation in international journals included in the Web of Science database and having an impact factor. The results of the dissertation research were presented at 4 scientific conferences in Lithuania and abroad.

Terminai ir apibrėžimai

Dedveitas – skirtumas tarp pakrauto ir tuščio laivo, tonomis.

Kampinis greitis – laivo sukimosi greitis manevruojant per laiko vienetą, išreiškiamas rad/s.

Laivo grimzlė – laivo povandeninė dalis, matuojama nuo ramaus vandens paviršiaus iki kylio.

Laivų manevrinės savybės – tai laivo techninės galimybės judėti suplanuota trajektorija ir nuo jos nenukrypti, sustoti numatytu atstumu arba nuo jo nenukrypti.

Mažas gylis – tai gylis, kai laivo grimzlės ir bendro gylio santykis yra 0,8 arba mažesnis.

Navigacinis saugumas – situacija, apimanti saugų laivų judėjimą uosto akvatorijoje, švartavimo ir atšvartavimo operacijų vykdymą laivams manevruojant vieniems ar pasitelkus vilkikus.

Poslinkis – laivo padėties pokytis per laiko vienetą.

Ribinės hidrometeorologinės sąlygos – sąlygos, kai esant stiprioms srovėms uoste galima riboti laivybą.

Ribinės meteorologinės sąlygos – sąlygos, kai esant nepalankiems oro reiškiniams, kaip stipriam vėjui, uoste ribojama laivyba.

Seklaus vandens efektas – reiškinys, kai esant mažam gyliui (grimzlės ir bendro gylio santykis 0,8 arba mažesnis) dėl susidariusio vandens spaudimo laivui manevruojant ima veikti papildomos jėgos.

Uosto akvatorija – vandens teritorija, kur priimami, išleidžiami ir švartuojami laivai, su išdėstytais laivybos ženklais, esamais uosto kanalais bei krantinėmis.

Uosto kanalas – specialiai išgilinta uosto vieta, kur vykdoma laivyba ir manevruoja laivai.

Uosto vilkikas – specialios paskirties laivas, aptarnaujantis į uostą įplaukiančius ir iš jo išplaukiančius laivus: padeda jiems manevruoti, atsišvartuoti ir prisišvartuoti.

Vilkimo jėga – vilkiko sukuriama jėga, leidžianti atlikti vilkimo, švartavimo, atšvartavimo darbus, vilkimo lynu perduodama aptarnaujamam laivui, išreikšta tonomis arba kiloniutonais.

Santrumpos

AIS – laivų padėties nustatymo sistema.

AIS-LERS – laivų padėties nustatymo sistema, suderinta su laivų judėjimo sistema.

ASD – vilkiko su dviem azimuto varikliais laivagalyje tipas (ang. *Azimuth stern drive*).

COLREG – Tarptautinė konvencija dėl tarptautinio laivų eismo reguliavimo siekiant išvengti laivų susidūrimų.

COVID-19 – koronavirusas.

DWT – dedveitas yra pakrauto ir tuščio laivo skirtumas, išreikštas tonomis.

E-SEA FIX – navigacinė sistema su specialia programine įranga.

GL-DNV – klasifikacinė bendrovė.

HANDY SIZE – sausakrūvių laivų (130–150 m ilgio ir 10 m grimzlės), kurių dedveitas – 24–35 tūkst. t, tipas.

IMO – Tarptautinė jūrų organizacija, atsakinga už rezoliucijų ir tvarkų, kurios įpareigoja valstybes jų laikytis, rengimą.

LAO – atstumas tarp laivo statinių.

LER – laivų eismo reguliavimo sistema.

LET – laivų eismo reguliavimo tarnyba.

PANAMAX – didžiausių parametrų laivas, galintis praplaukti senaisiais Panamos kanalo šliuzais.

POST PANAMX – laivas, talpinantis 10 tūkst. ir daugiau TEU.

SGD – suskystintos gamtinės dujos.
SIMFLEX – laivo tiltelio simulatorius.
SOLAS – 1974 metais Tarptautinės jūrų organizacijos priimtas dokumentas „Konvencija dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje“.
TEU – 20-ies pėdų ilgio konteinerio ekvivalentas.

Formulių simboliai

A – veikiamo paviršiaus plotas, $s \cdot m^2$.

A_c – laivo povandeninės dalies plotis, kurį veikia srovė, m^2 .

C_a – vėjo pasipriešinimo koeficientas (maksimali reikšmė – 1).

C_w – vandens pasipriešinimo koeficientas (priklauso nuo gylio / grimzlės santykio, dažniausia koeficientas siekia nuo 1 iki 5).

C_x – pasipriešinimo koeficientas.

C_y – šoninės arba keliamosios jėgos koeficientas.

C_{vx} – vairo hidrodinaminiai koeficientai X ašies atžvilgiu.

C_{vy} – vairo hidrodinaminiai koeficientai Y ašies atžvilgiu.

F_{NX} – pavairavimo įrenginio sukuriama jėga X kryptimi, N.

F_{NY} – pavairavimo įrenginio sukuriama jėga Y ašies kryptimi, N.

F_c – srovės sukuriama jėga, N.

F_{sw} – bangos sukuriama jėga, N.

F_w – veikianti vėjo jėga, N.

H_s – bangos aukštis, m.

H – gylis, m.

I_z – inercijos momentas Z ašies atžvilgiu, $N \cdot m$.

K_1 – aptarnaujamo laivo būklė, esant pagrindiniam varikliui ar jo nesant, turint papildomų vairavimo įrenginių ar ne. gali būti parinktas pagal monogramą (žr. Paulauskas 2013).

K_1' – sraigto įrašos koeficientas.

K_2 – koeficientas, priklausantis nuo hidrometeorologinių sąlygų.

K_s – srovės sukurta jėga, N.

k_{11} – pridėtosios vandens masės X ašies kryptimi koeficientas.

k_{22} – pridėtosios vandens masės Y ašies kryptimi koeficientas.

k_{66} – inercijos momento koeficientas, $N \cdot m$.

k_{NX} – pavairavimo įrenginio jėgos koeficientas X ašies kryptimi.

k_{NY} – pavairavimo įrenginio jėgos koeficientas Y kryptimi, N.

k_s – koeficientas, atitinkantis didelį gylį, priimamas apie 0,033.

l_N – pavairavimo įrenginio skersinės jėgos petys, m.

l_p – vairo skersinės jėgos petys, m.

L – laivo ilgis, m.

m – laivo masė, T.

M_N – momentas, sukuriamas laivo pavairavimo įrenginių, $N \cdot m$.

M_T – laivo sraigto(ų) sukuriamas momentas, $N \cdot m$.

M_a – aerodinaminės jėgos momentas, $N \cdot m$.

M_b – bangų sukuriamas momentas, $N \cdot m$.

M_c – srovės sukuriamas momentas, $N \cdot m$.

M_{in} – inercijos momentas, $N \cdot m$.

M_k – momentas, sukurtas laivo korpuso, $N \cdot m$.

M_p – momentas, sukuriamas laivo vairavimo mechanizmų, $N \cdot m$.

M_{sh} – momentas, sukuriamas seklaus vandens efekto, $N \cdot m$.

M_{tug} – momentas, sukuriamas naudojant vilkikus, $N \cdot m$.

M_{β} – laivo korpuso „sparno“ efekto sukuriamas momentas, $N \cdot m$.

N_v – vilkiko pagrindinių variklių veiksmingas galingumas, kW.

n_s – sraigčių skaičius.

P' – bendra „sparno“ jėga, N.

P_e – maksimali vilkiko sraigčių įrašos jėga, N.

P'_x – „sparno“ pasipriešinimo jėga, N.

P'_y – „sparno“ šoninė (keliamoji) jėga, N.

q_1 – poslinkis, m.

q_2 – poslinkis, m.

q_3 – poslinkis, m.

q_a – vėjo kurso kampas, rad.

q_c – srovės kurso kampas, rad.

R_{tr} – trinties koeficientas.

R_v – vilkiko pasipriešinimas, N.

S_p – vairo plokštės projekcijos į diametraliąją (vidurinę) plokštumą plotas, m^2 .

S_x – laivo viršvandeninės dalies projekcijos į diametraliąją plokštumą plotas, m^2 .

T_{lg} – laivagalio grimzlė, m.

T_{lp} – laivapriekio grimzlė, m.

T – laivo grimzlė, m.

t'' – sraigto koeficientas.

V_{r_w} – vėjo greitis, m/s.

V_{s_c} – srovės greitis, m/s.

v – laivo greičio modulis.

V – laivo vandentalpa, m^3 .

V_y – laivo korpuso skersinis judėjimo greitis, m/s.

v_x – laivo greitis X ašimi, m/s.

v_y – laivo greitis Y ašies atžvilgiu, m/s.

X_N – jėgos, sukuriamos laivo pavairavimo įrenginių X ašies atžvilgiu, N.

X_T – jėgos, sukuriamos laivo sraigto(ų) X ašies atžvilgiu, N.

X_a – aerodinaminės jėgos X ašies atžvilgiu, N.

X_b – jėgos, sukuriamos bangų X ašies atžvilgiu, N.

X_c – jėgos, sukuriamos srovės X ašies atžvilgiu, N.

X_{in} – inercijos jėga X ašies atžvilgiu, N.

X_k – jėgos, sukurtos laivo korpuso X ašies atžvilgiu, N.

X_p – jėgos, sukurtos laivo vairavimo mechanizmų X ašies atžvilgiu, N.

X_{sh} – jėgos, sukurtos seklaus vandens efekto X ašies atžvilgiu, N.

X_{tug} – jėgos, sukurtos naudojant vilkikus X ašies atžvilgiu, N.

X_β – laivo korpuso sukurtas „sparno“ efektas X ašies atžvilgiu, N.

Y_N – jėgos, sukurtos laivo pavairavimo įrenginių Y ašies atžvilgiu, N.

Y_T – jėgos, sukurtos laivo sraigto(ų) Y ašies atžvilgiu, N.

Y_a – aerodinaminės jėgos Y ašies atžvilgiu, N.

Y_b – jėgos, sukurtos bangų Y ašies atžvilgiu, N.

Y_c – jėgos, sukurtos srovės Y ašies atžvilgiu, N.

Y_{in} – inercijos jėga Y ašies atžvilgiu, N.

Y_k – jėgos, sukurtos laivo korpuso Y ašies atžvilgiu, N.

Y_p – jėgos, sukurtos laivo vairavimo mechanizmų Y ašies atžvilgiu, N.

Y_{sh} – jėgos, sukurtos seklaus vandens efekto Y ašies atžvilgiu, N.

Y_{tug} – jėgos, sukurtos naudojant vilkikus Y ašies atžvilgiu, N.

Y_β – laivo korpuso sukurtas „sparno“ efektas Y ašies atžvilgiu, N.

α_r° – vairo plokštės posūkio kampas, laipsniais.

λ_{11} – pridėtoji vandens masė X ašies kryptimi, T.

λ_{22} – pridėtoji vandens masė Y ašies ašimi, T.

ρ_a – oro tankis, kg/m³.

ρ_w – vandens tankis, kg/m³.

φ_1 – posūkis, rad.

φ_2 – posūkis, rad.

φ_3 – posūkis, rad.

f – laivo vidurinės plokštumos pilnumo koeficientas.

f' – mažo gylio poveikio koeficientas, gali būti paimtas iš monogramos.

Ω – sudrėkintasis vilkiko korpuso plotas, m².

g – Žemės traukos pagreitis, m/s².

β – laivo dreifo kampas, rad.

δ – laivo korpuso bendrasis pilnumo koeficientas.

ω – besisukančio laivo kampinis greitis, rad/s.

Turinys

| | |
|---|-----|
| IVADAS | 23 |
| 1. LAIVO MANEVRINIŲ GALIMYBIŲ IR UOSTO VILKIKŲ NAUDOJIMO MOKSLINIŲ TYRIMŲ BEI TARPTAUTINIŲ REIKALAVIMŲ ANALIZĖ | 29 |
| 1.1. Lietuvos mokslo darbų laivybos apžvalga saugumo, pasitelkus vilkikus, užtikrinimo uostuose tematika | 30 |
| 1.2. Užsienio šalių mokslo darbų apžvalga laivybos saugumo uostuose, pasitelkus vilkikus, tematika | 34 |
| 1.3. Tarptautinių vilkikų naudojimo uoste reikalavimų analizė | 39 |
| 1.4. Vilkikų darbo uoste analizė | 49 |
| 1.5. Pirmo skyriaus apibendrinimas | 57 |
| 2. VILKIKŲ NAUDOJIMO, SIEKiant GERINTI LAIVYBOS SAUGUMĄ UOSTE, TEORINIS PAGRINDIMAS | 61 |
| 2.1. Vilkikų darbo uoste tyrimas ir metodinių sprendinių algoritmo sudarymas | 62 |
| 2.2. Vilkikų naudojimo, gerinant laivų manevrines galimybes, teorinis metodas, pagrįstas d'Alamberto jėgų ir momentų principu | 64 |
| 2.3. Vilkikų traukos jėgos matematinio modelio ir metodinių nurodymų sudarymas | 85 |
| 2.4. Praktinio pritaikymo metodiniai sprendiniai | 86 |
| 2.5. Vilkimo lyno įtempimo skaičiavimo metodika | 87 |
| 2.6. Tyrimų tikslumo vertinimo metodika | 93 |
| 2.7. Skyriaus apibendrinimas | 94 |
| 3. EKSPERIMENTINIŲ IR SIMULIACINIŲ TYRIMŲ METODIKOS | 97 |
| 3.1. Vilkikuose atliktų eksperimentų matavimo įranga ir metodika | 98 |
| 3.2. Simuliatoriuje atliktų eksperimentų matavimo įranga ir metodika | 111 |
| 3.3. Skyriaus apibendrinimas | 115 |

| | |
|---|-----|
| 4. TEORINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI, JŲ PRITAIKYMAS, SIEKiant UOSTE UŽTIKRINTI NAVIGACINĮ LAIVYBOS SAUGUMĄ | 117 |
| 4.1. Eksperimentinio tyrimo rezultatai, jų vertinimas | 117 |
| 4.2. Simuliacinio tyrimo rezultatai | 128 |
| 4.3. Eksperimentinių ir palyginamųjų tyrimo rezultatų apibendrinimas bei pritaikymas, siekiant užtikrinti uosto navigacinį saugumą | 140 |
| 4.4. Skyriaus apibendrinimas | 150 |
| IŠVADOS | 153 |
| LITERATŪRA | 155 |
| DISERTACINIO DARBO APROBAVIMAS MOKSLO LEIDINIUOSE | 167 |
| GYVENIMO APRAŠYMAS | 169 |
| SUMMARY IN ENGLISH | 171 |

Įvadas

Problemos formulavimas

Siekiant uosto veiklos navigacinio saugumo pirmiausia reikėtų užtikrinti sklandų uosto vilkikų darbą. Laivo dydis, grimzlė ir kitos charakteristikos priklauso nuo gabenamų krovinių rūšies ir plaukimo atstumo. Šiuolaikiniuose uostuose lankosi skirtingų tipų ir dydžių laivai, gabenantys įvairius krovinius, taip pat ir priskiriamus pavojingiems: chemines medžiagas, suskystintas gamtines dujas, naftą. Be to, būtina atsižvelgti į tai, kad vis didėjant laivams daugeliui uostų tampa aktuali laivų įplaukimo problema, esant ribiniams uosto parametrams, kai ypač svarbu tinkamai suplanuoti ir įvertinti laivo manevravimo operacijas. Potencialiai pavojingiausios ir sudėtingiausios laivo manevravimo operacijos fazės yra jo įplaukimas pro uosto vartus, švartavimasis prie krantinių arba atsišvartavimas nuo jų, apsisukant uosto akvatorijos baseine. Vykdamas šias operacijas dažnai talkina uosto vilkikai, padedantys laivui saugiai vykdyti manevrus.

Žvelgiant į naujausias pasaulinės laivybos tendencijas galima konstatuoti, kad projektuojami ir statomi vis didesni laivai lemia iššūkius, kaip saugiai aptarnauti laivus uostuose per patį trumpiausią laiką, siekiant išlaikyti ir padidinti uosto konkurencingumą. Nelaimingi atsitikimai uostuose, ilgas vilkimo operacijų ir laivų aptarnavimo laikas svarbus finansiniu aspektu, nes tai tiesiogiai susiję su negautomis pajamomis arba avarijos ar nelaimių atvejais – dideliais finansiniais, dažnai ir ekologiniais nuostoliais. Neracionaliai naudojant turimus uosto vilkikus didinamas generuojamos CO₂ emisijos kiekis.

Šiuo atveju aktualu sukurti metodiką, kurią taikant būtų galima apskaičiuoti vilkimo operacijai būtina traukimo jėgą ir minimalų vilkikų skaičių, atsižvelgiant į laivo parametrus ir nestandartines ar ribines laivybos meteorologines sąlygas, siekiant užtikrinti saugų uosto darbą.

Mokslinė problema

Siekiant laivybos uoste saugumo, kad uostas galėtų priimti įplaukiančius numatyto dydžio laivus ir užtikrinti jų navigacinį saugumą, būtina nustatyti naudotiną minimalų vilkikų skaičių ir būtina jų traukimo jėgą, kad būtų galima saugiai atlikti laivo manevravimo operacijas. Tenka konstatuoti, kad uostai dažnai neturi bendros minimalaus vilkikų skaičiaus nustatymo, atsižvelgiant į ribines laivybos sąlygas, kai uostuose ir jų prieigose neužtikrinamas būtinas laivybos saugumas, metodikos.

Uosto įplaukos kanalų, akvatorijų gylis ir plotis, krantinių techniniai parametrai lemia į uostą įplaukiančių laivų saugaus manevravimo galimybes. Daugeliu atvejų, siekiant užtikrinti navigacinį saugumą, pasitelkiami uosto vilkikai. Taigi rengiant uosto vilkikų darbo metodiką, siekiant saugiai aptarnauti laivą, būtina atlikti tyrimus, kaip konkrečiu atveju nustatyti būtina minimalų vilkikų skaičių ir traukos jėgą.

Saugios laivybos gairės, pateikiamos Tarptautinės jūrų organizacijos (TJO) direktyvose ir norminiuose dokumentuose, apimant ir saugaus laivų manevravimo uostuose rekomendacijas, daugeliu atvejų pateikia bendrąsias gaires, neatsižvelgiant į uostų specifiką (IMO 2021a).

Iki šiol minimalaus vilkikų skaičiaus ir vilkimo jėgos nustatymas vykdytas remiantis vietos standartais ar konkrečiomis uosto taisyklėmis, atsižvelgiant į tipines uosto laivybos sąlygas, tačiau dažnai kyla specifinių klausimų, kurių sprendimo standartai paprastai nenumato.

Kadangi minimalių vilkikų skaičiaus ir vilkimo jėgos parinkimo metodikose bei standartuose į meteorologines ir hidrodinamines sąlygas atsižvelgiama nedaug, laivų navigacinis avaringumas uostuose ir jų prieigose vis dar išlieka aktuali problema.

Šiandien uoste taikomi moksliniai metodai, įvertinantys reikiamą vilkikų traukos jėgą, apsiriboja vykdant vilkimo operaciją veikiančių išorinių jėgų skaičiavimu, nevertinant tų jėgų krypties, lyno įtempimo, seklaus vandens poveikio, todėl tiesiogiai jie gali būti naudojami ribotai.

Disertacijoje nagrinėjama mokslinė problema, kaip nustatyti minimalų būtina vilkikų skaičių ir traukos jėgą, esant ribinėms meteorologinėms ir hidrometeorologinėms sąlygoms bei nestandartinėms situacijoms, įvertinus srovės ir vėjo greitį bei kryptį, nedidelio gylio poveikį, remiantis tyrimo rezultatais, kurių taikymas leistų racionaliai planuoti uosto vilkikų darbą ir didinti navigacinį laivybos saugumą uoste.

Disertacijos tikslas

Remiantis kitų mokslinių tyrimų analize ir eksperimentinių tyrimų rezultatais, parengti metodinius nurodymus, kurie leistų nustatyti vilkikų traukos jėgą ir būtiną jų skaičių, siekiant pagerinti navigacinį laivybos saugumą uostuose, išnagrinėti ir pasiūlyti praktinių veiksmingų vilkikų naudojimo uostuose metodų bei sprendimų, kaip mažinti galimą laivų manevravimo uostuose riziką sudėtingomis sąlygomis, veikiant įvairaus stiprumo ir krypties srovėms, vėjo jėgoms ir sekliojo vandens efektui.

Disertacijos tyrimo objektas

Disertacijos tyrimo objektas – laivo valdomumas ypatingomis uosto sąlygomis pasitelkus vilkikus, kai prišvartuojamas ar atšvartuojamas laivas sujungtas su jais lynu veikiant išorinėms jėgoms, kurias jie turėtų kompensuoti, siekiant užtikrinti vilkimo operacijos sėkmę sudėtingomis meteorologinėmis ir hidrologinėmis sąlygomis.

Disertacijos uždaviniai:

1. Atlikti mokslinių darbų ir praktinių atvejų, susijusių su vilkikų naudojimu laivams įplaukiant į uostus ir išplaukiant iš jų, analizę, norminių dokumentų ir taikomų vilkikų traukimo jėgos parinkimo metodikų vertinimą;
2. Atlikti eksperimentinius vilkikų traukos tyrimus realiomis sąlygomis ir jų skaitinį modeliavimą, gautus tyrimo rezultatus panaudoti rengiant vilkikų traukos jėgos skaičiavimo metodiką;
3. Eksperimentinio ir skaitinio modeliavimo rezultatų pagrindu, atsižvelgiant į analitinius sprendinius, parengti vilkikų naudojimo uostuose metodinius pagrindus, siekiant didinti navigacinį saugumą laivybos uostuose;
4. Parengti praktinio naudojimo metodinius sprendinius.
5. Atlikti pavyzdinį vilkikų naudojimo, esant ribinėms sąlygoms, vertinimą.

Mokslinis naujumas

1. Parengtas matematinis vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos uostuose, atsižvelgiant į laivų parametrus ir gamtines sąlygas, skaičiavimo modelis leidžia tiksliau įvertinti vilkikų naudojimo veiksmingumą, siekiant saugiai plukdyti laivus uostų kanalais ir užtikrinti jų švartavimo operacijų, esant nestandartinėms ar ribinėms situacijoms, saugumą.

2. Sukurti metodiniai vilkimo operacijų uostuose vykdymo skaičiuojant vilkikų naudojimo ir vilkimo lynų įtempimo, taikant vektorinį metodą, nurodymai leidžia racionaliau naudoti vilkikus uoste gerinant navigacinį laivybos saugumą.

Disertacijos ginamieji teiginiai

1. Remiantis teorinių ir eksperimentinių tyrimų palyginamosios analizės rezultatais, sukurtas matematinis modelis ir jo pagrindu – kompleksiniai uosto vilkikų traukos jėgos bei jų skaičiaus nustatymo metodiniai pagrindai, siekiant užtikrinti uoste navigacinį laivybos saugumą ekstremaliomis ir ribinėmis sąlygomis.
2. Sukurti kompleksiniai vilkikų naudojimo uostuose metodiniai pagrindai, leidžiantys nustatyti optimalią būtiną vilkikų traukos jėgą, atsižvelgiant į laivų parametrus ir meteorologines sąlygas (vėjo, srovės greičiai ir jų kryptys bei seklumos poveikio veiksnys), vilkimų operacijų schemas, siekiant užtikrinti navigacinį laivybos uoste saugumą.
3. Vektorinio metodo pagrindu sukurta ir verifikuota metodologinė priemonė leidžia nustatyti vilkimo lynų įtempimą, lemiantį vykdomų vilkimo operacijų patikimumą.

Praktinė reikšmė

Parengti laivo ir vilkiko manevrinių savybių jiems manevruojant uosto akvatorijoje skaičiavimo metodikos pagrindai leidžia nustatyti optimalų vilkikų skaičių ir traukos jėgą, kurie būtinu tikslumu užtikrintų vilkimo operacijos saugumą sudėtingomis sąlygomis.

Sudarytas laivo ir vilkiko manevrinių savybių tyrimo, vykdant operacijas sudėtingomis sąlygomis, modelis leidžia:

- patikslinti laivo ir vilkiko manevrines savybes, jiems manevruojant uosto akvatorijoje vykdant įvairias operacijas;
- užtikrinti laivybos saugumą uosto prieigose ir akvatorijoje;
- nustatyti optimalų vilkikų skaičių ir traukos jėgą, siekiant trumpinti vilkimo operacijos laiką, savo ruožtu mažinant laivų sąnaudas;
- parengti optimalią vilkiko vykdomo vilkimo schemą, siekiant užtikrinti jo atliekamų operacijų saugumą.
- Remiantis tyrimo rezultatais racionaliai naudoti turimus uosto vilkikų išteklius.

Darbo aprobavimas

Disertacinio darbo rezultatai aprobuoti, rengiant metodinius nurodymus, atlikus eksperimentinius laivų atšvartavimo Klaipėdos uoste operacijų nuo krantinių nr. 67a ir 72, be to, kruizinio laivo MS „Rotterdam“, tyrimus.

Darbo metodika

Atliekant tyrimą taikyti analitiniai, eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo metodai. Eksperimentiniai laivų manevravimo parametrų tyrimai atlikti KLASCO 1 ir KLASCO 3 vilkikuose, naudojant kalibruotą simulatorių „SimFlex Navigator“. Matavimai atlikti ir duomenys kaupti naudojant vilkikuose sumontuotą navigacinę bei įvairių vilkimo parametrų fiksavimo įrangą, meteorologinių ir hidrometeorologinių parametrų matavimo prietaisus. Matematinis modelis sudarytas taikant d’Alamberto principą ir vektorinį metodą. Matematinis modeliavimas, skaičiavimai, rezultatų apdorojimas atlikti naudojant *Matlab* programinės įrangos paketą. Gautų rezultatų tikslumas vertintas taikant statistinius matematikos metodus.

Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Šiuolaikinio uosto darbas be laivus aptarnaujančių vilkikų neįsivaizduojamas. Jie užtikrina saugų laivų manevravimą uosto kanaluose, posūkio manevrų atlikimą, prisišvartavimą ir atsišvartavimą. Šiandien galima skirti kelis pagrindinius uosto vilkikų tipus: įprastiniai vilkikai su standartiniu fiksuoto žingsnio sraigtu, vilkikai su azimuto pavairavimo mechanizmu laivagalyje ir traktoriniai vilkikai (angl. *voith-shneider*) (Artyszuk 2013). Kiekvienas vilkiko tipas pasižymi tam tikromis techninėmis savybėmis ir pritaikomumo spektru, tad parenkant optimalų vilkiką, kuris veiksmingai aptarnaus laivus, atsižvelgiama į kelis pagrindinius aspektus: uosto geografinės sąlygas, aptarnaujamų laivų dydį ir ypatybes, vyraujančias meteorologines ir gamtines sąlygas. Daugelis šiuolaikinių laivų turi papildomus pavairavimo mechanizmus, kurie iš dalies atstoja vilkikų funkcijas. Naftos, cheminių medžiagų, suskystintų gamtinių dujų tanklaiviai bei sausakrūviai laivai dažnu atveju papildomų pavairavimo mechanizmų neturi, tad jų manevravimo uoste ir navigacinį saugumą užtikrina vilkikai (Aydın ir kt. 2018; Kornacki 2007; Toma, Oncica 2016).

Uosto saugumą užtikrinantys uosto vilkikai padeda laivams manevruoti jiems įplaukiant į uostą ir išplaukiant iš jo, plaukiant uosto kanalais, apsisukant, švartuojantis prie krantinių ir atsišvartuojant nuo jų, prireikus jie uostuose bei jų prieigose atlieka priešgaisrines ir gelbėjimo operacijas, ledlaužio funkcijas uostų akvatorijose

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

ir kanaluose. Paprastai vilkikų skaičius ir jų traukos jėga nustatomi remiantis turima patirtimi, taigi nėra optimalūs.

Laivybos transporto priemonės – viena sparčiausiai besivystančių transporto rūšių pasaulyje. Jūrų transporto priemonėmis gabenama 80 % viso pasaulio prekių srauto, Baltijos jūrai tenka maždaug 15 % viso pasaulinės laivybos apkrovos intensyvumo (Havsmiljöinstitutet 2014; Aro ir Rytter 2020). Nuolat Baltijos jūroje plaukioja beveik 2000 laivų, dar maždaug 3500–5000 jų kas mėnesį plaukioja reguliariais maršrutais, dažna jų stotelė – vienas iš Baltijos jūros uostų (Magdalena Klopott 2016). Remiantis statistikos duomenimis, 2011–2022 metais Baltijos jūroje ir jos uostuose įvyko 25 614 laivybos nelaimingų atsitikimų, lėmusių tokias pasekmes: nuskendo 230 laivų, sužaloti 7694 žmonės, žuvo – 696 (European Maritime Safety Agency 2023). Taigi navigacinis saugumas jūroje ir uostuose – aktuali ir nuolat pasaulyje žmogiškojo veiksnio, įrangos gedimo, infrastruktūros ir laivų manevravimo ypatybių aspektais nagrinėjama tema. Nelaimės uostuose ar jūroje lemia finansinius ir ekologinius nuostolius, tad jų prevencija – viena iš plačiai nagrinjamų mokslinių tyrimų temų, analizuojant laivų manevringumo arba žmogiškojo veiksnio nulemtų klaidų problematiką. Laivybos Baltijos jūroje intensyvumas lemia ir nelaimių jūroje bei uostuose gausą. Daugiausia Baltijos jūroje plaukioja keleiviniai ir keleiviniai krovininiai laivai (ro-ro ir ro-pax tipo), maždaug 22 % visų plaukiojančių laivų – naftos ir cheminių medžiagų tanklaiviai (HELCOM 2018). Dažniausiai pasitaikančios laivybos nelaimių vietos – uosto prieigos ir patys uostai, joms tenka 59,9 % visų nelaimių, o dažniausi nelaimingi atsitikimai – užplaukimas ant seklumos, laivų susidūrimas, laivo įrangos gedimas, tai sudaro maždaug 55 % visų nelaimių (Mazaheri ir kt. 2015; BSMIR Project Team 2014). Taigi ypač svarbu užtikrinti navigacinį laivo saugumą uosto prieigose ir pačiame uoste, tam ir pasitelkiami uosto vilkikai, leidžiantys išvengti pasikartojančių nelaimių, kurios lemia materialinius nuostolius bei daro žalą gamtai.

1.1. Lietuvos mokslo darbų apžvalga laivybos saugumo, pasitelkus vilkikus, užtikrinimo uostuose tematika

Nemažą indėlį vykdant laivybos ir uosto saugumo tyrimus įneša Lietuvos mokslininkai, atliekantys tyrimus uostų plėtros, laivybos saugumo, laivų manevravimo, šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos mažinimo laivyboje temomis. Jų atliekami uosto saugumo užtikrinimo pasitelkus vilkikus tyrimai vykdomi šiomis pagrindinėmis kryptimis: įvairiomis sąlygomis veikiančių vilkikų manevrinių savybių tyrimai; optimalaus vilkikų skaičiaus ir traukos jėgos nustatymas esant įvairioms meteorologinėms ir hidrometeorologinėms sąlygoms; alternatyvių kuro šaltinių, tokių kaip suskystintos gamtinės dujos ar amoniakas, naudojimas vilkikuose.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Uosto vilkikų moksliniai tyrimai vykdomi, siekiant nustatyti jų veikimo įvairiomis sąlygomis principus. Vienas tokių tyrimų susijęs su pažangiausiais laivų statybos metodais pasitelkiant pramonės 4.0 metodus, kurie leidžia išmaniai bei taupant išteklius valdyti visas laivų gamybos projekto stadijas ir jas optimizuoti, be to, gamybos procese diegti pažangias technologijas, tokias kaip elektros variklių. Šios priemonės naudojamos uosto vilkikų gamyboje, siekiant mažinti aplinkos taršą, didinant jų veikimo efektyvumą. Tyrimai susiję ir su naujomis energijos taupymo bei jos atkūrimo technologijomis, kurios, siekiant mažinti energijos sąnaudas, leistų išnaudoti vilkiko variklio galios rezervą (Verseckaitė, Jakubavičius 2024; Jakovlev ir kt. 2017). Be to, atliekami vilkikų vairavimo ir manevringumo procesų tyrimai, apimantys vilkikų kapitonų mokymąsi pasitelkus simulatorius, tai leidžia tiksliau įvertinti vilkiko sąveiką su aptarnaujamu laivu ir gerinti laivo valdymo įgūdžius (Paulauskas ir kt. 2021; Senčila ir kt. 2020). Vykdomi ir vilkikų saugumo užtikrinimo tyrimai: vilkikų stabdymo sistemų veikimo tobulinimo, siekiant išvengti nelaimingų atsitikimų, jų ergonomikos tobulinimo, siekiant mažinti darbuotojų nuovargį ir jų sužalojimų riziką (Paulauskas, Paulauskas 2023; Paulauskas ir kt. 2023). Visi šie tyrimai leidžia įvertinti vilkikų veikimą, siekiant didinti jų efektyvumą, užtikrinti saugumą, įvertinus aplinkosaugos aspektus.

Sparčiai augant tarptautinės prekybos mastams ir spartėjant vis didesnių laivų statybos procesams (angl. *Very Large Crude Carrier – VLCC; Very Large Containers Ship – VLCS; Ultra Large Container Ship – ULCS* tipo), daugeliui uostų kyla ribinio dydžio laivų priėmimo sunkumų (Kang, Gao ir Meng 2020; Bondarenko, Nekrasov ir Yastreba 2016). Kartu spręstinas ir vilkikų naudojimo, veikiant ribinėmis sąlygomis su didžiausiais galimais į uostą įplaukti laivais, schemų klausimas, siekiant užtikrinti saugų manevravimą. Daugeliu atvejų norint modifikuoti ir plėsti uosto infrastruktūrą reikia laiko ir didelių investicijų, tad siekiant maksimaliai išnaudoti uosto pajėgumą aptarnaujant didžiausius galimus laivus bei užtikrinti uosto saugumą veiksmingas vilkikų pritaikymas yra vienas galimų sprendimų (Paulauskas, Paulauskas ir Wijffels 2009; Paulauskas 2006).

Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros plėtros parametrų tarpusavio ryšį savo darbe tyrė D. Paulauskas (Paulauskas 2019a). Jo atlikto tyrimo rezultatai leidžia optimizuoti uosto plėtros investicijas, siekiant uosto konkurencingumo ir laivybos saugumo. Atlikti tyrimai gali svariai prisidėti optimaliai investuojant į uosto plėtrą bei infrastruktūrą, uostus valdančioms atsakingoms institucijoms rengiant investicinius uostų plėtros planus.

Uosto vilkikų darbo problematiką laivams švartuojantis prie krantinių ir atsišvartuojant nuo jų bei atitinkamus metodus nagrinėja V. Paulauskas ir D. Paulauskas (Paulauskas, Paulauskas ir Wijffels 2008). Vykdam šias operacijas ypatingas vaidmuo, užtikrinant jų saugumą ir sklandžią eigą, tenka vilkikams. Kadangi jie turi kompensuoti susidariusias išorines laivus veikiančias jėgas, šias operacijas būtina kruopščiai

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

planuoti. Atlikti tyrimai yra universalūs, pateiktais jų rezultatais gali remtis uostų ir vilkikų kapitonai.

Vilkikų poveikį uosto saugumui prevencijos aspektu savo paskelbtuose tyrimuose nagrinėja Klaipėdos universiteto mokslininkai (V. Paulauskas, D. Paulauskas) ir disertacijos autorius (Simutis 2021). Tyrimai atskleidė, kad uosto akvatorijoje sugedus laivo varikliui prarandamas jo greitis, tad pasitelkus vilkiką ir atliekant apskaičiuotus manevrus, įvertinus meteorologines ir hidrometeorologines sąlygas, galima stabilizuoti situaciją ir laivą saugiai nutempti iki švartuotis tinkamos vietos, taip išvengiant užplaukimo ant seklos, atsitrenkimo į krantinę ar kitus laivus bei ekologinių nelaimių.

V. Paulauskas su tyrėjų komanda atliko vidaus vandenų galimybių išnaudojimo ir pritaikymo, praplečiant bei papildant logistikos grandines, studiją (Paulauskas ir kt. 2022). Viena nagrinėjamų alternatyvų – vilkikų, kurie stumia arba traukia įvairius krovinius gabenančias baržas, pasitelkimas. Išvadose teigiama, kad esant tinkamoms sąlygoms vidaus vandenų transporto naudojimas gali lemti teigiamą ekonominį efektą, mažinant kelių apkrovimą, vilkikai šiuo atveju atliktų svarbų vaidmenį.

Lietuvos mokslininkų įdirbis, užtikrinant laivų manevravimo ir uosto saugumą, turi senas tradicijas ir apima platų tyrimų lauką, nagrinėjant tiek vilkikų manevrines savybes, tiek uosto navigacinio saugumo problemas, vis tik apžvelgti tyrimai neapima vilkimo operacijai atlikti būtinos vilkikų traukos jėgos tyrimų, kai vertinamas srovės, vėjo ir seklaus vandens poveikis.

Šiuo metu plačiai įvairiais aspektais nagrinėjama jūrų transporto dekarbonizacijos problema – tiek ieškant alternatyvių kuro šaltinių, tiek kitų inžinerinių bei technologinių sprendimų. Vilkikams šiuo atveju didelis dėmesys skiriamas dėl kelių priežasčių: didžiąją laiko dalį jie operacijas vykdo uostuose bei jų prieigose, kurie savo ruožtu dažnai įsikūrę miestuose arba šalia jų, veikdami visu arba beveik visu pajėgumu, tai lemia didesnę CO₂ ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą palyginti su įprastu darbo režimu. CO₂ emisijų mažinimo transporto sektoriuje problemą siekiama spręsti nustatant privalomas įgyvendinti priemones, kurios išdėstytos IMO standartų rinkinyje (IMO 2023). 2011 m. liepos mėn. Jūrų aplinkos apsaugos komitetas pristatė energijos vartojimo efektyvumo projektavimo indekso (angl. *Energy efficiency design index* – EEDI) reikalavimą, nuo 2013 m. sausio 1 d. šis reikalavimas griežtinamas, nustatyti trys etapais kas penkerius metus (IMO 2011).

Iš visų transporto rūšių laivybai tenka 11 % pasaulinio CO₂ išmetamo kiekio (Sterling 2010; Inácio ir kt. 2020; Klaipėdos miesto savivaldybė 2012). Alternatyvių kuro šaltinių naudojimas laivyboje šiuo metu plačiai nagrinėjama tema, jaučiant didžiulį valstybių ir įvairių institucijų spaudimą mažinti prie klimato šiltėjimo prisidedančią CO₂ dujų emisiją. Šiuo metu tiek eksperimentiniu, tiek praktiniu lygmenimis daugiausia naudojami kuro šaltiniai yra suskystintos gamtinės dujos (angl. *Liquefied Natural Gas* – LNG), amoniakas, elektra ir vandenilis (Gałczyński, Ruszel ir kt. 2017;

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Bloomber, n. d.; USAID, U.S. Department of Energy 2018). Siekiant mažinti CO₂ bei kitas emisijas uosto vilkikuose priimami atitinkami elektrifikavimo ir automatizavimo sprendimai bei naudojami alternatyvūs kuro šaltiniai. Suskystintų gamtinių dujų naudojimą vilkikuose tyręs L. Norkevičius (Lebedevas, Norkevičius ir Zhou 2021) nagrinėjo techninius klausimus: – vilkiko hidrodinaminis ir plūdrumo aspektus, kaip jį pritaikyti suskystintoms gamtinėms dujoms, be to, vertino ir ekonominį bei aplinkosaugos efektą, tradicinius dyzelinius vilkiko variklius pakeitus suskystintomis gamtinėmis dujomis varomais varikliais. Pateiktose išvadose skiriama tiek ekonominė, tiek aplinkosauginė nauda gerinant oro emisijos rodiklius vilkikui veikiant uoste. Oro taršos stebėsenos klausimus uostuose nagrinėja M. Rapalis ir D. Šilas. Jie tiria neuroninių tinklų naudojimo uostuose galimybes stebėdami oro taršos rodiklius, tai gali suteikti informacijos realiu laiku ir prognozuoti taršos plitimą (Giedrius ir Šilas 2021). Gauta informacija leistų tiksliai nustatyti normą viršijusius taršos šaltinius ir griežtinant taisykles atitinkamai apmokestinti teršėjus.

Ekologinius ir taršos prevencijos klausimus nagrinėja V. Paulauskas su savo komanda (Paulauskas, V., Filina-Dawidowicz ir Paulauskas, D. 2020). Pagrindinis jų tyrimo tikslas – ieškoti teršalų kiekio uostuose mažinimo galimybių, sukurti metodą, kuris leistų įvertinti žmoniškojo veiksnio poveikį taršos prevencijos kontekste. Tyrimo išvadose teigiama, kad emisijos iš laivų kiekis gali priklausyti nuo laivo kapitono ir locmano kvalifikacijos: teisingi kvalifikuotų specialistų veiksmai emisiją galėtų mažinti 12,5 % ar daugiau. Tyrimo rezultatai leido palyginti išmetamų teršalų eksploatuojant laivus kiekį naudojant dyzelinį ir SGD kurą. Konstatuota, kad aplinkai draugiškesnio kuro (pvz., SGD) naudojimas gali mažinti laivų išmetamų teršalų kiekį iki 30 %, SO_x – iki 100 %.

Nors tiesiogiai disertacijos tyrime išskiriamų emisijų mažinimo klausimas vykdant vilkimo operacijas nenagrinėjamas, sukurtas matematinis modelis įvertintų konkrečiai vilkimo operacijai būtiną vilkikų traukos jėgą esant atitinkamoms meteorologinėms ir hidrometeorologinėms sąlygoms, tai užtikrintų racionalų uosto vilkikų išteklių naudojimą, vengiant perteklinio jų darbo, kai situacija to nereikalauja, taip teoriškai išvengiant perteklinių emisijų vykdant vilkimo operacijas išskyrimo.

Klaipėdos universiteto mokslininkai kartu su verslo organizacijomis aktyviai dalyvauja vykdant elektrinių autonominių keltų, vilkikų projektavimą ir atliekant skaičiavimo tyrimus, kurie ateityje gali iš esmės keisti esamą situaciją: naudojant alternatyvius kuro šaltinius ar elektra varomus laivus pasitelkus dirbtinį intelektą, bus galima mažinti žmoniškojo veiksnio poveikį uoste ir jo prieigose, savo ruožtu – ir nelaimių bei laivų susidūrimų skaičių ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas (Klaipėdoje sukurtas inovatyvus elektrinis baržų stūmikas n. d.; Plotnikova, Vienažindienė ir Slavinskas 2022; Djakov ir kt. 2023).

Apžvelgus lietuvių mokslininkų darbus, apibendrinant ryškiausius aspektus bei vystomas tyrimų kryptis, galima skirti laivų manevrinių savybių ir uosto parametrų

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

gerinimo tyrimus, siekiant maksimaliai išnaudoti turimą uosto infrastruktūros potencialą: laivo variklių parametrų gerinimo tyrimai leidžia užtikrinti saugų į uostą įplaukiančių maksimalaus dydžio laivų manevravimą. Apžvelgtuose laivų manevravimo tyrimuose vilkikų traukos jėgos parinkimo metodika, atsižvelgiant į meteorologines sąlygas ir jų poveikį parenkant būtiną vilkikų traukos jėgą ir skaičių, siekiant manevravimo saugumo atšvartuojant ar priešvartuojant laivus, nevertinama.

1.2. Užsienio šalių mokslo darbų apžvalga laivybos saugumo uostuose, pasitelkus vilkikus, tematika

Kadangi uosto vilkikai užtikrinant uosto saugumą ypač svarbūs, įvairiais taikomais metodais siekiama įvertinti konkrečiai situacijai būtiną jų skaičių ir vilkimo jėgą (Chou, Wen ir Huang 2021; Sun ir kt. 2024; Strem 2004). Tai aktualu ir transporto bei logistikos sistemoms, jų taikymo tvarumo siekiant optimalių vilkikų skaičiaus ir traukos jėgos parinkimu.

Tiesioginis vilkikų pasitelkimas, kai jie padeda laivams manevruoti uoste, ir netiesioginis, kai pasitelkiami antrinės funkcijos, kaip gaisrų prevencija bei lokalizavimas, nelaimių ir jų padarinių likvidavimas, bei įvairioms kitoms su navigaciniu saugumu susijusioms užduotims uosto akvatorijoje. Pagrindinės užsienio šalių mokslininkų tyrimų kryptys: vilkikų manevravimas; optimalaus vilkiko korpuso projektavimas; vilkiko dinaminė savybių ir autonominio darbo tyrimai.

Daugelis pasaulio uosto administracijų turi parengusias taisykles ir standartus, kurie reglamentuoja vilkikų naudojimą, siekiant užtikrinti maksimalų įvairių operacijų uostuose bei jų prieigose atlikimo ir laivo bei vilkikų įgulų narių saugumą. Standartai numato reguliarią techninę vilkikų apžiūrą: vilkimo įrangos techninės būklės patikra, atliekama klasifikacinės bendrovės; vilkiko komunikacijos ir navigacijos prietaisų kalibravimas bei patikra; vilkikų kapitonų ir įgulos narių mokymai; darbo organizavimo tobulinimas, nuolatinis įgulos narių praktikavimas ir atitinkamų įgūdžių ugdymas dirbant įvairiais operaciniais režimais realiomis sąlygomis (Naing 2018; Perkovic ir kt. 2016; Young ir Borg-Costanzi 2021; Roubos ir Groenewegen 2017). Tiriant vilkikų kapitonų elgseną ir įpročius galima nustatyti avarijų sukėlimo bei įvairaus pobūdžio vilkikų įrangos gedimo veiksnius ir pasiūlyti priemonių, kurios leistų mažinti šių veiksnių poveikio riziką (Singh ir Raju 2016). Kita naudinga priemonė – vilkiko darbo standartų rengimas, apimantis vilkimo schemas, atsižvelgiant į laivo ilgį bei tipą ir meteorologines sąlygas (Drobitko 2021). Dar viena svarbi priemonė, susijusi su naujausių technologijų diegimu vilkikuose – automatinės vilkikų sistemos, leidžiančios, kaip atskleidžia naujausi tyrimai, reikšmingai mažinti avarijų ir nelaimių uostuose skaičių bent 10 % nuo visos tyrimo imties, eliminavus žmogiškojo veiksnio poveikį (Özden 2021). Pažymėtina, kad turkų mokslininkų aprašytos tiriamos vilkikų saugos

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

sistemos šiuo metu praktiškai dar neįgyvendintos, o pateikti darbo rezultatai gauti atliekant matematinį modeliavimą ir simuliacinius tyrimus, vykdant būsimums vilkikų saugumo užtikrinimo projektus.

Viena iš tyrimų krypčių susijusi su vilkiko propulsijos įrenginių jėgos optimizavimu ir kontrolės sistemų tobulinimu. Šie tyrimai apima naujų propulsijos įrenginių projektavimą, testavimą ir gamybą, naujų laivo kontrolės bei valdymo sistemų projektavimą ir diegimą, gerinant laivų manevringumą bei vilkimo operacijų vykdymą (Nitonye, Adumene ir Howells 2017; Karaçay ir Özsoysal 2021). Vykdytų tyrimų išvadose teigiama, kad remiantis minėtų tyrimų metodologijomis ir efektyviai išnaudojant vilkiko propulsijos jėgą vilkimo operacijos vykdymo laiką galima sumažinti net iki 12–15 %.

Nemažai tyrimų nukreipti į vilkikų darbo ir užimtumo planavimo problemos sprendimą. Tai ypač aktualu dideliuose uostuose, kur aptarnaujami VLCS (iki 15 tūkst. TEU) ir ULCS (iki 24 tūkst. TEU) tipo konteineriniai laivai. Jų aptarnavimas uostuose dažnai susijęs su ribinėmis uosto infrastruktūros galimybėmis, tad šioms operacijoms dėl laivų gabaritų būtina skirti ypatingą dėmesį ir kruopščiai joms pasirengti (Galor ir Kornacki 2007). Poreikį tinkamai planuoti ir paskirstyti vilkikų pajėgumą, siekiant išvengti vėlavimo ir prastovų, lemia patiriami materialiniai nuostoliai bei galima uosto veiklos išderinimo rizika. Taikant *ad-hoc* algoritmą galima spręsti vilkikų apkrovos problemą programuojant jų veiklos tarpusavio grandines ir taip juos kuo efektyviau naudojant (Kang ir Meng 2020; Wei, Jia ir kt. 2020). Šis tyrimo metodas, paremtas analitinių ir statistinių duomenų analize, leidžia priimti sprendimus realiu laiku ataskaitų forma, kuri priklauso nuo keliamos užduoties. Skirtingai nuo įprastų ataskaitų, *ad-hoc* analizė leidžia lanksčiau tirti rezultatus, pritrūkus duomenų. Visgi šis metodas paremtas analitiniu problemos nagrinėjimu, o tam būtina duomenų bazė, šiuo atveju susijusi su įvairiais vilkikų darbo aspektais, taigi būtina kaupti įvairius statistinius duomenis. Visgi vykdant matematinį konkrečios esamos vilkimo situacijos modeliavimą didelių duomenų masėvų nereikia. Kitų mokslininkų atliktų tyrimų išvadose teigiama, kad daugiau kaip 30 % pasaulio uostų būdingas netinkamas vilkikų išteklių paskirstymas, taikant tyrime pristatomą planavimo metodą vilkikų naudojimo efektyvumą galima padidinti 7–12 %.

Siekiant užtikrinti laivų navigacijos saugumą ir efektyvumą, pasaulyje plačiai vykdomi tyrimai turi didelę praktinę reikšmę: kaip optimaliai paskirstyti į uosto kanalą įplaukiančius ir išplaukiančius laivus bei parengti kiekvienam jų optimalius eismo tvarkaraščius. Sprendžiant šiuos klausimus būtina kruopščiai planuoti vilkikų naudojimą: kad laivai kuo greičiau prisišvartuotų ir atsišvartuotų, manevruotų uoste, reikia tiksliai apskaičiuoti būtiną traukos jėgą ir vilkikų skaičių. Tai susiję ne tik su optimaliu turimų uosto išteklių naudojimu, bet ir su uosto saugumo aspektais. Šiuose tyrimuose, išanalizavus uosto kanalų ribas ir kitas ypatybes, siūloma bendra uždaro kanalo uosto

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

baseinuose struktūra, be to, aptartos pagrindinės laivų eismo įvykių priežastys (Li ir kt. 2021; O'zoga ir Montewka 2018; Zalewski ir Montewka 2007).

Tyrimuose aprašyti pagrindiniai laivų navigacijos procesai ir operacijos, susijusios su uosto infrastruktūra, apžvelgti uosto procesų simuliaciniai modeliai (Piaggio ir kt. 2019; Olba ir Daamen 2018; Theirs ir Jansses 1998). Pristatyta išsami naujausių simuliacinio modelių apžvalga, susijusi su uosto procesų vertinimo aspektais pagal atrinktus kriterijus, ypatingą dėmesį skiriant laivų navigaciniam saugumui, atsižvelgiant į uosto infrastruktūrą.

Bendrieji laivų manevravimo modeliai uoste ir jų prieigose, taikomi realiu laiku, nagrinėjami tyrime, kurį parengė M. Kurowsky su komanda (Kurowsky ir kt. 2013). Sukurti du laivų trajektorijos prognozavimo modeliai, kuriuos kuriant numatyta laivų išplaukimo už uosto kanalo ribų ar susidūrimo su navigacinėmis kliūtimis tikimybė: (1) atliekant statistinę laiko eilučių analizę, kai autoregresyvas ir slenkančio vidurkio modeliai pateikia proceso aprašymą dviem daugianariais, kurių vienas skirtas autoregresijai (AR), kitas – slankiajam vidurkiui (MA) (angl. *Autoregressive-moving-average model with exogenous inputs model* – ARMAX) nustatyti; (2) pirmojo modelio įvesti duomenys apdorojami taikant A. Markovo modelį (Davis 2016). Jis taikomas prognozuojant kintamojo, kurio numatomą vertę veikia tik esama būseną, o ne kokia nors ankstesnė veikla, reikšmę. Taigi jis taikomas skaičiuojant laivų manevringumą duotuoju momentu, atsižvelgus į plaukiojimo sąlygas. Modelio trūkumas – galimybė pritaikyti ne visai sistemai, bet tam tikram jos elementui, kaip tyrimo atveju buvo pritaikyta laivo pavairavimo mechanizmui.

Manevravimo modeliai leidžia gana greitai įvertinti hidrodinaminius veiksnius laivui plaukiant giliuose ir sekliuose vandenyse, nustatyti bei projektuoti vieno ir dviejų sraigčių laivų plaukimo trajektorijas (Taimuri, Matusiak ir kt. 2018). Rezultatai pagrįsti laivų, kurių skirtingos korpuso formos konfigūracijos ir varomosios jėgos, zigzago bei posūkio ciklo trajektorijų eksperimentais.

Gana nauja, bet sparčiai besiplečianti tyrimų sritis – visiškai elektra varomų autonominių laivų manevravimo nuspėjimo modeliai ir efektyvios energijos valdymo sistemos. Šiais modeliais siekiama sujungti manevravimo, energijos ir galios (angl. *power and propulsion system* – PPS) valdymo sistemas į bendrą visumą, siekiant didinti degalų (energijos) naudojimo efektyvumą ir gerinti laivo eksploatacines savybes (Haseltalab ir Rudy 2020; Chen ir kt. 2021). Siekiant gerinti laivo valdomumą siūlomas modelio nuspėjamojo valdymo (angl. *model predictive control* – MPC) algoritmas, pagrįstas įvesties ir išvesties grįžtamojo ryšio linearizacija (angl. *Input-Output Feedback Linearization* – IOFL). Taikant šį algoritmą numatyta laivo operacijai būtina traukos jėga vėliau perkeliama į siūlomą prognozuojamo energijos valdymo (PEM) algoritmą, kuris vykdant operacijas optimaliai ją paskirsto tarp laivo energijos šaltinių (Zhichao ir kt. 2023). Tai gali didinti kuro panaudojimo efektyvumą ir užtikrinti energijos sistemos stabilumą.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Tiriant linijinį laivų judėjimą fiksuota mažesnė amplitudė, palyginti su standartinėmis reikšmėmis. Savitas kiekvieno laivo manevravimas analizuotas atsižvelgiant į jo dydį, jūrines sąlygas, švartavimosi vietą ir vilkikų naudojimą (Jurdziński 2020). Tai leidžia efektyviai analizuoti uosto eksploatacines sąlygas ir numatyti švartavimosi zonos specifiką, galimas problemas bei rizikas (Bitner-Gregerse ir kt. 2016).

Sukurtas hibridinis skaitmeninis modelis pritaikytas vertinti bangų (dviejų tipų) poveikį uostuose prišvartuotiems laivams. Šis metodas pagrįstas W. J. M. Rankine 3-D plokštumos metodo ir impulsinio atsako teorijomis. Taikomas trimatis plokštumos metodas įvertina laivo poslinkį jam atliekant įvairius manevrus veikiančias hidrodinamines jėgas. W. J. M. Rankine 3-D plokštumos metodas vertina ir bangų poveikį, kuris modeliuojamas laiko intervale, remiantis impulsinio atsako teorija (Lee, C.-K. ir Lee, S.-G. 2018). Pateiktas modelis apima bangų poveikį prišvartuotam laivui, bet nevertina srovės ir vėjo poveikio.

Turimos žinios ir patirtis, gebėjimas vertinti ir modeliuoti vilkikų naudojimą uoste ypač svarbūs siekiant užtikrinti jo saugumą. Šios problemos visuotinai nagrinėjamos siekiant nustatyti optimalias vilkikų naudojimo uoste sąlygas uosto saugumo užtikrinimo aspektu (Gucma 2007).

Kadangi visi uostai yra unikalūs, jų išsidėstymas ir laivų manevravimo zonos skiriasi. Nepaisant geografinio išsidėstymo, kitų lokacijos savybių ir uosto teritorijos ypatumų, būtina užtikrinti uoste judančių laivų saugumą. Mokslininkų atlikti tyrimai atskleidžia įvairaus pobūdžio nelaimingų atsitikimų, laivams atliekant posūkio ar stabdymo manevrus, tarpusavio ryšį, tad svarbu optimizuoti jų judėjimo laiką ir pagal galimybes mažinti manevrų uosto viduje skaičių, čia ypač svarbi už tai atsakingų žmonių kvalifikacija (Bye Rolf 2018; Fan, Zhang ir kt. 2018). Pagrindiniai optimalaus uosto vilkikų naudojimo veiksniai – laivų atliekamų manevrinių operacijų tipai ir vilkikų pagalbos efektyvumas.

Išanalizavus vilkikų skaičiaus nustatymo, kai manevruoti uostuose ribinio dydžio laivams padeda keli vilkikai, metodų taikymo tyrimų rezultatus, galima konstatuoti, kad dažniausiai tai pasitaiko didžiuosiuose uostuose, kur planavimo problemos šiandien tampa sudėtingu pasaulinių transporto ir logistikos grandinių problemų padiktuotu klausimu. Kelių vilkikų ir laivo sistemos manevringumo, laivą bei vilkikus veikiančių išorinių ir vilkiko sukuriamų jėgų bei momentų analizės modelį pristatė G. Wu (Wu ir kt. 2021), jį taikant ieškoma manevringumą, vykdant vilkimo operaciją, veikiančias jėgas.

Proveržis eksperimentiniuose tyrimuose įvyko taikant netiesinį metodą, sukūrus matematinį modelį, kurį taikant įvertinamos realios sistemos charakteristikos, taip patvirtintas eksperimentinio teorinio testo ir realios operacijos tarpusavio ryšys (Wu, Zhang ir kt. 2022). Apibendrinant G. Wu pateiktas išvadas, kad vilkimo proceso stabilumas ir efektyvumas priklauso nuo lyno ilgio bei tvirtinimo taško padėties, galima teigti, kad šie parametrai tiesiogiai veikia laivo ir vilkiko manevrines savybes vykdant

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

vilkimo operaciją (Park, Lee ir kt. 2021). Mokslininkų komandos iš Italijos, Lenkijos ir Vokietijos nariai nagrinėjo vilkiko ir aptarnaujamo laivo stabilumo problemas vykdant vilkimo operacijas (Piaggio, Viviani ir Martelli 2018; Inoue ir Lim 2020). Siekdami ištirti ir apibūdinti vilkimo sistemos parametrus, tokius kaip kurso ir vilkimo sistemos stabilumas, esant skirtingoms sąlygoms, mokslininkai pasitelkia ne tiesinės sistemos matematikos teoriją (Peng Du ir Ouahsine 2018). Remiantis atliktų vilkiko įtempiamojo lyno tyrimų rezultatais, formuojama prielaida, kad vilkimo linija yra simetriška. Tai reiškia, kad lyno sistemos savybės jo priekyje ir gale yra tos pačios, taigi velkant išlaikoma pusiausvyra. Vilkimo sistemos matematinis modelis sudaromas remiantis vilkimo lyno įtempimo ir elastingumo parametrų vilkimo procese skaičiavimais. Mokslininkų atliktų tyrimų rezultatai ir išvados apibendrina tokių savybių kaip kokybė, elastingumas ir vilkimo judesio stabilumas tarpusavio sąsajas (Zou ir kt. 2020; Fitriadhy ir Yasukawa, 2015). Pateiktas modelis apima vilkimo lynų mechanines savybes esant vienodoms stabilioms sąlygoms, bet nevertina, kaip keičiasi tempimo lynų savybės esant srovės ir vėjo poveikiui, ypač laivams manevruojant. Rekomenduojama ateityje tirti vilkimo lyno savybes laivams manevruojant uoste skirtingomis meteorologinėmis sąlygomis, kaip bangavimas, vėjo stiprumas ir kryptis. Be to, matematinis modelis turėtų būti papildytas skaičiavimais, kaip keičiasi vilkimo lyno savybės laivui ir vilkikui judant, pastarajam siekiant išjudinti laivą iš statinės padėties. Tyrimo išvadose pateikti rezultatai atskleidžia, kad labiausiai lyno apkrovimą veikia bangavimas, ypač laivams esant skirtinguose bangos cikluose. Daugiau kaip 50 % visų nelaimių priežasčių sudaro situacijos, kai vykdant vilkimo operacijas trūksta lynas, viršijus jo maksimalias leistinas apkrovas, prisidėjus laivo ir vilkiko svoriui.

N. M. Quy, K. Łazuga, L. Guema, J. K. Vrijling ir P. H. A. J. M. van Gelder (Quy, Łazuga ir kt. 2020) tyrime pateikti bendro pobūdžio laivų manevravimo modeliai, leidžiantys geriau suprasti saugios laivybos uoste procesą ir jo metodus bei atlikti galimos rizikos analizę, neturint visos informacijos apie laivų ir vilkikų sąveiką. Vilki- mo saugumo aspektu svarbus tyrimas, kuriuo siekiama įvertinti laisvąjį vilkimo lyną veikiančias jėgas vilkikui ir laivui atliekant posūkius. Tyrimo rezultatai atskleidė, kad vilkikas tapo pažeidžiamas, praradęs kontrolę ir valdomumą velkamo laivo atžvilgiu, dėl ko vilkimo lynas prarado įtempimą (Fitriadhy, Yasukawa ir Maimun 2015).

Taigi galima daryti išvadą, kad vilkikų naudojimo uoste tyrimai yra svarbūs ir turi apimti įvairias laivų manevravimo uoste sąlygas bei situacijas. Atlikus mokslinių darbų apžvalgą galima teigti, kad ši sritis nepakankamai ištirta. Mokslinių tyrimų apžvalga atskleidė, kad dažnai tiriamos vilkikų manevrinės savybės ir jų sąveika su aptarnaujamu laivu mažai tiriant išorinių jėgų poveikį, kuris, remiantis įvairiais statistiniais ir tyrimų duomenimis, ypač svarbu uosto navigaciniam saugumui vykdant vilkimo operacijas. Be to, atlikta analizė atskleidė, kad užsienio šalių mokslininkai, nagrinėdami vilkiko darbą vilkiko korpuso optimizavimo aspektu, paprastai apsiriboja laivo manevrinių savybių tyrimais. Aukščiau apžvelgtų autorių teigimu, tai gali 5–10 %

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

pagerinti vilkiko manevrines savybes, be to, tiriant sraigtų mechanizmo sukuriama jėgą ir jos efektyvumą, gerinant ir optimizuojant vilkiko korpuso geometriją, diegiant naujausias technologijas, vilkiko efektyvumą galima padidinti 3–7 %.

Taigi užsienio mokslininkų darbų analizė leidžia teigti, kad mažai vykdyta vilkiką veikiančių išorinių jėgų, jų krypčių ir kitų veiksnių, pavyzdžiui, seklaus vandens efekto, kompleksinio vertinimo tyrimų, tad būtina esamus tyrimus praplėsti juos papildant meteorologinių ir hidrologinių veiksnių vertinimu. Tai leistų apskaičiuoti reikiama vilkikų traukos jėgą konkrečiomis sąlygomis, įvertinus vilkiko manevrines savybes, bei pateikti metodologinius vilkimo operacijų uoste saugumo konkrečioje situacijoje nurodymus. Toks tyrimas būtų reikšmingas gerinant laivybos navigacinę saugumą uoste, siekiant išvengti nelaimių vykdant vilkimo operacijas, nepakankamai arba visiškai neįvertinus aptartų išorinių veiksnių.

1.3. Tarptautinių vilkikų naudojimo uoste reikalavimų analizė

Laiavų atvykimas į uostą ir išvykimas iš jo yra svarbūs laivo kelionės aspektai. Kadangi abu šie procesai yra sudėtingi ir rizikingi, jiems būtina kruopščiai pasiręsti. Tiek mašinų skyriaus, tiek kapitono tiltelio darbuotojai turi iš anksto pasiruošti, kad užtikrintų paties laivo ir įgulos narių saugumą. Prieš atvykdama į uostą laivo įgula turi suplanuoti ir aptarti galimas situacijas, parengti darbų planą, kuris būtinas siekiant užtikrinti laivo švartavimosi ir krovinių gabenimo uoste saugumą (International Maritime Organization 2010).

Saugią, efektyvią ir tvarią laivybą uoste leidžia užtikrinti tarptautiniai norminiai dokumentai, reglamentuojantys laivų judėjimą uostuose. Tai įvairios konvencijos, taisyklės ir gairės. Pateikiame keletą jų pavyzdžių.

Tarptautinės laivybos organizacijos (IMO) konvencijos ir kodeksai:

1. **SOLAS – Tarptautinė konvencija dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje** (angl. *Safer Life at Sea*) nustato saugos standartus ir reikalavimus laivams jų statybos, įrangos, saugaus valdymo ir kitais aspektais (International Maritime Organization 1998). Konvencija apibrėžia ir vilkikų darbą: nustato operacijų vykdymo saugumą užtikrinančias darbo saugos procedūras, siekiant išvengti sužalojimų, avarijų, įrangos gedimo ar laivo apgadinimo.
2. **MARPOL – Tarptautinė konvencija dėl teršimo iš laivų prevencijos** (angl. *Marine Pollution*). Jos siekis – taršos iš laivų mažinimas. Ji apima įvairias laivuose būtinas priemones, kurios padeda mažinti jūros taršą, taip pat ir uoste vykdant vilkimo operacijas (International Maritime Organization 1978).
3. **ISPS – Tarptautinis laivų ir uosto įrenginių (terminalų) apsaugos kodeksas** (angl. *International Ship and Port Facility Security*) reglamentuoja uostų

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

ir laivų saugumo priemonės, siekiant apsisaugoti nuo teroristinių atakų (International Maritime Organization 2003). Pažymėtina praktika, kad SGD laivus pasitinka, palydi ir padeda uoste manevruoti keturi vilkikai, nors esant palankioms sąlygoms dažnai užtektų ir dviejų. Kadangi strateginiams objektams numatytas didesnis saugumo laipsnis, pasitelkiama daugiau vilkikų nei reikėtų, kad galimo nelaimingo atsitikimo atveju būtų suvaldyta situacija.

4. **UNCLOS – Jungtinių Tautų jūrų teisės konvencija** (angl. *United Nations Convention on the Law of the Sea*) nustato jūrų ir vandenynų teisinį režimą bei pareigas, įskaitant teisę į laisvą laivybą ir valstybių suverenitetą jūrose, taip pat vilkikų naudojimą atvirose jūrose ir uostuose (United Nations 1982).
5. **STCW – Tarptautinė konvencija dėl jūrininkų rengimo, atestavimo ir budėjimo normatyvų** (angl. *Standards of Training, Certification and Watch-keeping for Seafarers*) nustato jūrininkų mokymo, sertifikavimo ir įgulos narių stebėjimo reikalavimus, siekiant užtikrinti jų kompetenciją bei saugumą (IMO 2010). Žmogiškojo veiksnio poveikis dėl skirtingos ar menkos įgulos narių kvalifikacijos išlieka viena dažniausių nelaimių uostuose priežasčių. Konvencijoje kalbama ir apie vilkikų įgulas, kurioms tenka didelė atsakomybė užtikrinti uosto laivybos saugumą, tad vilkikų operatoriai (bendrovės) įpareigojami nuolat tobulinti įgulų narių kvalifikaciją ir kompetencijas.
6. **FAL – Konvencijos dėl tarptautinės jūrų laivybos sąlygų lengvinimo** (angl. *Facilitation of International Maritime Traffic*) siekia supaprastinti ir palengvinti tarptautinį laivybos srautą, įskaitant uostų procedūras ir formalumus, taip pat ir optimalaus vilkikų panaudojimo (International Maritime Organization 1965).
7. **COLREG – Tarptautinė konvencija dėl laivų susidūrimo prevencijos** (angl. *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*) (IMO 1972). Šiame dokumente pateikiamos pagrindinės laivų eismo saugumą užtikrinančios gairės.

Pagrindinės tarptautinės organizacijos laivybos ir uostų organizacijoms rengia saugios laivybos gaires ir rekomendacijas. Tokios organizacijos, kaip, pvz., Tarptautinė uostų asociacija (angl. *International Association of Ports and Harbors – IAPH*) (IAPH n. d.) ir Tarptautinė jūrų kapitonų asociacija (angl. *International Maritime Pilots' Association – IMPA*) (IMPA n. d.), skatina nuolatinį uostų kapitonų ir ločmanų kvalifikacijos tobulinimą ir kt.

Kitos nacionalinės ir tarptautinės taisyklės. Šalis ar regionas gali taikyti ir kitas laivybos veiklą uostuose reglamentuojančias taisykles bei konvencijas.

Tarptautinė jūrų organizacija (angl. *International Maritime Organization – IMO*) konkrečių laivų įplaukimo į uostą ir išplaukimo iš jo procedūrų bei priemonių nereglamentuoja, tačiau pateikia saugios laivybos ir laivų manevravimo rekomendacijas,

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

kuriomis turėtų vadovautis laivybos ir uosto bendrovės. Pavyzdžiui, laivybos bendrovės „Limarko grupė“ (Klaipėda), „Maersk“ (Danija), MSC (Šveicarija) valdo įvairios paskirties ir dydžio laivus, tad privalo užtikrinti kompetentingų laivų įgulos narių, kurie galėtų priimti sprendimus, užtikrinančius saugų laivų manevravimą laivų plaukiojimo rajonuose ir uostuose, į kuriuos įplaukia, rengimą.

Trys laivybą reglamentuojančios konvencijos yra ypač svarbios. Tai 1974 m. priimta Tarptautinė konvencija dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje (SOLAS); 1972 m. priimta Konvencija dėl susidūrimų jūroje išvengimo (COLREG) ir 1978 m. priimta Tarptautinė konvencija dėl jūrininkų rengimo, atestavimo ir budėjimo standartų (STCW). Su laivybos sauga susijusios priemonės numatytos SOLAS konvencijos penktame ir kituose skyriuose. 2000 m. gruodį tarptautinė jūrų organizacija (IMO) priėmė naują šio skyriaus redakciją: jis atnaujintas įtraukus naujų reikalavimų, kurie įsigaliojo 2002 m. Čia aptariami saugios laivybos atviroje jūroje, uosto prieigose ir pačiame uoste aspektai. Pagrindinė korekcija dėl vilkikų darbo saugumo – numatytas meteorologinių sąlygų vertinimas, perspėjimai ir rekomendacijos (IMO 2021c).

Laivybos saugumą uostuose, jų prieigose ir atviroje jūroje užtikrina Laivų eismo tarnyba (angl. *Vessel Traffic Service* – VTS), teikianti laivams pranešimus apie meteorologines sąlygas, pavojus, perspėjimus ir koordinuojanti jų eismą. Kitaip tariant, ši sistema užtikrina laivo ir uosto tarpusavio sąveiką koordinuojant saugų laivų judėjimą ir manevravimą kitų laivų atžvilgiu. Laivas, įplaukdamas į laivų eismo reguliavimo zoną, susisiekiama su atsakingomis uosto institucijomis (dažniausia radijo ryšiu), toliau visi veiksmai jo plaukimo zonoje stebimi ir derinami Laivų eismo tarnybos (LET). Laivai turi užtikrinti budėjimą, kad laiku gautų navigacinius ar kitus įspėjimus, be to, LET operatorius gali tiesiogiai susisiekti su laivu, esant nelaimingo atsitikimo rizikai arba kitiems laivybos apribojimams dėl nelaimių ar pan. Laivų eismo tarnybos teikiamos paslaugos reglamentuotos SOLAS dokumente V/12, kur teigiama, kad šalies vyriausybė gali teikti laivybos reguliavimo paslaugą (VTS), kai eismo apimtys arba rizikos laipsnis pateisina tokios paslaugos būtinumą.

Laivų eismo reguliavimo sistemos (LER) poveikį navigacijos saugumui pirmą kartą pripažino TJO 1968 m. priimtoje rezoliucijoje A.158 (ES.IV) – Rekomendacija dėl uosto konsultavimo sistemų (IMO 1968). Tobulėjant technologijoms, modernėjant laivybos eismo stebėjimo įrangai sistema darėsi sudėtingesnė, tad prireikė aiškių gairių, kaip standartizuoti LER sistemų steigimo procedūras. 1985 m. TJO priėmė rezoliuciją A.578(14) „Dėl laivų eismo paslaugų gairių“ (IMO 1985) RESOLUTION A.578(14, kurioje teigiama, kad LER sistemos gali užtikrinti laivybos saugumą uosto prieigose, laivybos kanaluose ir zonose, kur yra didelis eismo intensyvumas arba kyla laivybos sunkumų, pavyzdžiui, dėl siaurų kanalų, taip pat vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą. Gairėse nurodyta, kad sprendimus dėl laivo navigacijos ir manevravimo priima laivo kapitonas. Pabrėžta laivavedybos svarba ir saugumo gairių, galimų pavojų perspėjimo ataskaitų teikimo tvarka laivams, plaukiantiems

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

rajonu, kuriame veikia LER sistemos. Vėliau, 1997 m., šias gaires pakeitė rezoliucija A.857(20) (IMO 1997) RECALLING ALSO resolution A.158(ES.IV, kurioje pateiktos operatorių įdarbinimo, jų kvalifikacijos ir mokymo rekomendacijos.

Be konvencijų ir rezoliucijų, Tarptautinė jūrų organizacija (IMO) parengė keletą kodeksų ir rekomendacijų, įskaitant gaires saugios navigacijos uostuose ir jų prieigose klausimais, be to, laivų navigacinės bei radijo ryšio įrangos veikimo standartus. Kai kurios yra tiesiog rekomendacijos, nors ir pripažįstama, kad jos veiksmingai formuoja tarptautinę praktiką, tuo tarpu kitos nurodytos atitinkamuose konkrečių konvencijų nuostatuose, todėl joms teikiama tokia pat reikšmė kaip ir pačioms konvencijos nuostatoms. Laivybos saugumo reguliavimo komitetas (angl. *Maritime safety committee* – MSC) (MSC n. d.) yra įgaliotas prižiūrėti Laivų eismo reguliavimo tarnybos veiklą, o jos pagalbinės institucijos, ypač Navigacijos, ryšių ir paieškos bei gelbėjimo pakomitetas (angl. *Navigation, Communication, Search and Rescue* – NCSR) (NCSR n. d.), padeda visais techniniais klausimais.

Iki šiol minimalus vilkikų skaičius ir būtina vilkimo jėga parenkami remiantis vietos standartais ar uosto taisyklėmis, kurios įvertina tipines uosto laivybos sąlygas, tačiau kiekvienu konkrečiu atveju kyla specifinių klausimų, kurių sprendimų standartai nenumato.

Išanalizavus pasaulio uostuose vyraujančias praktikas ir tvarkas, uosto vilkikų darbą reglamentuojančius algoritmus bei taisykles, galima skirti šiuos pagrindinius punktus, kurie yra bendri ir būdingi išanalizuotiems uostams (Klaipėdos, Vokietijos, Anglijos, Kroatijos, Prancūzijos, Ispanijos ir kt.): locmano funkcijos pasitinkant ir išlydint laivus; laivo kapitono funkcijos laivui įplaukiant į uostą, manevruojant jame ir išplaukiant iš jo; bendri laivo priėmimo uoste reikalavimai; uosto vilkikų naudojimo sąlygos (Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija 2008).

Daugeliu atvejų esant vilkikų naudojimo poreikiui, jų skaičių ir technines charakteristikas nustato laivo kapitonas, vilkikų užsakymas derinamas su uosto kapitonu (locmanu), kuris turi visą informaciją apie laivo švartavimosi vietos sąlygas ir būtiną patirtį. Įvertinus pirminį laivo kapitono sprendimą dėl vilkikų pasirinkimo ir nustatčius, kad jis neužtikrins laivo saugumo, locmanas gali pagrįstai rekomenduoti jį keisti, bet tik laivo kapitonas sprendžia, priimti tas rekomendacijas ar ne. Uosto kapitono potvarkiu gali būti nustatytos privalomos vilkikų paslaugos laivo savininko sąskaita šalių susitarimu (laivo kapitono ir vilkikų paslaugas teikiančios įmonės), atsižvelgiant į laivų technines charakteristikas, laivybos ypatumus tam tikroje uosto vietoje, hidro-meteorologines sąlygas ir kt., siekiant užtikrinti laivybos saugumą, išvengiant navigacinių ir hidrotechninių įrenginių pažeidimo ar pavojaus žmonėms, gamtai bei materialiniam turtui. Laivo vilkimui vadovauja ir už vilkimo operaciją atsako velkamo laivo kapitonas. Laivą velkant vilkiko kapitonas privalo vykdyti laivo kapitono nurodymus. Gavęs nurodymą priimti vilkimo lyną iš laivo, vilkiko kapitonas, įvertinęs laivo greitį,

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

turi įsitikinti, kad operaciją atlikti bus saugu. Laivo greitį iš anksto suderina vilkiko ir laivo kapitonai, jis turi būti minimalus, siekiant užtikrinti laivo valdymo saugumą (JCG 2010).

Uosto saugumo veiksnius galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: laivų manevravimą apsunkinančios sąlygos ir vilkikų skaičių bei vilkimo jėgą lemiantys veiksniai. Į juos atsižvelgia viso pasaulio šalių uosto administracijos (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Saugumą uoste ir vilkikų parinkimą lemiantys veiksniai

Table 1.1. Risk factors in a ports

| Veiksniai, apsunkinantys arba ribojantys laivų manevravimą uoste | Vilkikų skaičių ir vilkimo jėgą lemiantys veiksniai |
|---|--|
| Tamsus paros metas | Uosto tipas ir jo prieigos |
| Ledai uosto akvatorijoje | Aplinkos sąlygos |
| Draudimas atlikti vilkimo operaciją, kai vėjo greitis gūsiuose viršija 14 m/s. Jeigu vėjo greitis viršija 10 m/s ar esant sudėtingoms vilkimo ar švartavimo sąlygoms, vilkikų skaičių būtina derinti su atsakingomis uosto institucijomis | Į uostą įplaukiančių laivų tipas |
| | Dažniausi vilkikų naudojimo konkrečiuose uostuose metodai |
| | Uosto vilkikų skaičius ir pajėgumai |
| | Vilkiko įgulos narių patirtis |
| | Turimas biudžetas |
| | Sąlygos, kai vėjas ir srovė apsunkina švartavimąsi |

Vilkiko efektyvumą lemia daugelis veiksnių, tokių kaip vilkiko dydis, galia, meteorologinės ir hidrologinės sąlygos, vilkimo greitis. Jūrų transporto saugumo gairių rinkinyje ND-0030 (GL Noble Denton 2013) pateikiama vilkikų traukos efektyvumo įvertinimo lentelė, kur: H – bangos aukštis, BP – vilkiko traukos jėga.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

1.2 lentelė. Vilkiko efektyvumas vykdant operaciją uoste ir jo priegose

Table 1.2. Tug efficiency during operation in a port and near by

| Traukos jėga, T | Vilkiko efektyvumas, % | | | | |
|-------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | Rami jūra | Bangos aukštis (H) = 2 m | Bangos aukštis (H) = 3 m | Bangos aukštis (H) = 5 m | Bangos aukštis (H) = >6 m |
| $BP \leq 30$ | 80 | $50 + BP$ | $30 + BP$ | BP | 0 |
| $BP = 30-90$ | 80 | 80 | $52,5 + BP/4$ | $7,5 + 0,75 \times BP$ | Menkas |
| $BP \geq 90$ | 80 | 80 | 75 | 75 | Menkas |

Paprastai uosto rekomendacijose pateikiami išorinių jėgų (vėjo, srovės, bangų) poveikio laivui nustatymo modeliai. Matematinis modelis leidžia apskaičiuoti būtiną vilkikų skaičių ir vilkiko traukos jėgas, atsižvelgiant į išorinių jėgų, tokių kaip vėjas, srovės ir bangos, poveikį. Šie elementai imami esant blogiausiam galimam scenarijui, dažniausiai šoniniam vėjui, o gautos jėgos gali būti naudojamos kaip atskaitos vertė, kurią vilkikai turi kompensuoti. Dažniausiai taikomi šie išorinių jėgų vertinimo modeliai (GL Noble Denton 2013).

Vėjo poveikio skaičiavimo:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot C_a \cdot \rho_a \cdot V r_w^2 \cdot A, \quad (1.1)$$

kur:

F_w – veikianti vėjo jėga [N];

C_a – vėjo pasipriešinimo koeficientas (maksimali reikšmė – 1);

ρ_a – oro tankis [kg/m^3];

$V r_w^2$ – vėjo greitis [m/s];

A – veikiamo paviršiaus plotas [m^2].

Srovės poveikio skaičiavimo:

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho_w \cdot V_{sc}^2 \cdot A_c, \quad (1.2)$$

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

kur:

F_c – srovės sukuriama jėga [N];

C_w – vandens pasipriešinimo koeficientas (priklauso nuo gylio ir grimzlės santykio, dažniausiai k siekia nuo 1 iki 5);

ρ_w – vandens tankis [kg/m^3];

V_{sc} – srovės greitis [m/s];

A_c – srovės veikiamas laivo povandeninės dalies plotis [m^2].

Bangų poveikio skaičiavimo:

$$F_{sw} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot L \cdot H_s^2}{16}, \quad (1.3)$$

kur:

F_{sw} – bangos sukuriama jėga [N];

ρ_w – vandens tankis [kg/m^3];

g – žemės traukos jėga [m/s^2];

L – laivo ilgis [m];

H_s – bangos aukštis [m].

Būtina paminėti, kad pateikti vėjo ir srovės poveikio skaičiavimo modeliai seklaus vandens efekto bei srovės ir vėjo poveikio krypčių nevertina. Šie veiksniai papildomai veikia laivus jiems manevruojant uoste – švartuojantis ir atsišvartuojant, jų įvertinimas leistų užtikrinti vilkimo operacijos saugumą. Kadangi bangų poveikis uostuose yra nedidelis, nes daugeliu atvejų uostai yra tarsi uždari vandens telkiniai su įplaukimo / išplaukimo vartais, laivams manevruoti tai netrukdo, be to, nėra tikslių bangų poveikio matavimo priemonių.

Išanalizavus praktikas ir pavyzdžius, kaip uostai nustato būtiną vilkikų skaičių ir jėgą, žemiau pateikiami keli rekomendacijų pavyzdžiai Europos uostuose: Korko (*Cork*), Geteborgo (*Göteborg*), Belfasto (*Belfast*), Omišo (*Omiš*).

Belfasto uoste, esant vidutiniam vėjo greičiui iki 20 mazgų, taikomi minimalūs vilkimo reikalavimai. Jei vėjo greitis viršija 20 mazgų, vilkimo reikalavimus įvertina laivo kapitonas ir locmanas, galutinį sprendimą tvirtina uosto kapitonas (žr. 1.3 lentelę).

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

1.3 lentelė. Belfasto uoste rekomenduojamas vilkikų skaičius laivams švartuojantis prie krantinių OB1, OB2 ir OB3

Table 1.3. Recommended port tug quantity in Belfast port during mooring and unmooring on jetty's OB1, OB2, OB3

| Krantinė | Bendras laivo ilgis (m) | Būtinai vilkikų skaičius ir traukos jėga (T) | |
|---------------------|---|--|-------------------------------|
| | | Atvykimas | Išvykimas |
| OB 1 ir OB 2 | Mažiau kaip 105 m | Vilkiko nereikia | Vilkiko nereikia |
| | 105–130 m, esant priekinio pavairavimo mechanizmui | Vienas vilkikas – ≥ 20 t | Vienas vilkikas – ≥ 10 t |
| | 130–150 m, esant priekinio pavairavimo mechanizmui | Vienas vilkikas – ≥ 20 t | Vienas vilkikas – ≥ 20 t |
| | Laivai be papildomų pavairavimo mechanizmų | Vertinama konkre- ti rizika | Vertinama konkreti rizika |
| OB 3 | Iki 120 m su priekiniu pavairavimo mechanizmu | Vilkiko nereikia | Vilkiko nereikia |
| | Daugiau kaip 120 m be priekinio pavairavimo mecha- nizmo | Vienas vilkikas – ≥ 10 t | Vienas vilkikas – ≥ 10 t |

Korko uoste minimalus vilkiko skaičius ir vilkimo jėga nustatomi atsižvelgiant į laivo manevrines savybes ir meteorologines sąlygas, kai esant 20 mazgų vėjui uosto darbas ribojamas. Meteorologinėms sąlygoms viršijus šią ribą, sprendimą dėl laivų švartavimo uoste pasitelkus vilkikus priima uosto kapitonas (žr. 1.4 lentelę).

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

1.4 lentelė. Korko uoste rekomenduojamas vilkikų skaičius

Table 1.4. Recommended tug quantity in Kork port

| Laivo ilgis | Atvykimas | | Išvykimas | | Vilkikų poreikis |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| | B/T | be B/T | B/T | be B/T | |
| LOA – <120 m | – | – | – | – | Nereikia |
| LOA – 120–140 m | – | Vienas vilkikas – >12 T | – | Vienas vilkikas – >12 T | Nereikia |
| LOA – >140 m | Vienas vilkikas – >30 T | Du vilkikai – >70 T | Vienas vilkikas – >30 T | Du vilkikai – >70 T | Reikia |

Pastaba: LOA – bendras laivo ilgis (angl. *Length overall* – LOA); B/T – priekinis pavairavimo mechanizmas.

Geteborgo uosto vilkikų taisyklės parengtos konsultuojantis su Švedijos jūrų administracija, jos numato vilkikų skaičių laivui įplaukiant į Geteborgo uostą ir išplaukiant iš jo. Vilkikų skaičius apskaičiuojamas esant normalioms srovės sąlygoms ir vėjo stiprumui iki 10 m/s. Viršijus šias įprastas sąlygas ar įvertinus kitas galimas aplinkybes, gali prireikti didesnio vilkikų skaičiaus. Rekomendacijos parengtos, atsižvelgiant į laivų manevrines savybes ir uostą lankančių laivų techninius parametrus, įvertinus ir papildomų pavairavimo mechanizmų turėjimo galimybę (žr. 1.5 lentelę).

1.5 lentelė. Geteborgo uoste rekomenduojamas vilkikų skaičius

Table 1.5. Recommended tug quantity in Gotenborg port

| Laivo ilgis LOA, m | Papildomas priekinis pavairavimo mechanizmas | Papildomi priekinis pavairavimo ir ypač našus vairo mechanizmai | Priekinis ir galinis pavairavimo mechanizmai | Priekinis pavairavimo mechanizmas ir du propeleriai |
|-----------------------|--|---|--|---|
| 120–139 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 140–179 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 180–209 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 210 ir daugiau | 3 | 3 | 1 | 1 |

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Omišo uoste taikomi minimalūs vilkikų reikalavimai, esant hidrometeorologinėms sąlygoms, kai vėjo greitis neviršija 15 mazgų laivams įplaukiant ir išplaukiant, pateikti 1.6 lentelėje. Vilkių galia nenurodyta.

1.6 lentelė. Omišo uoste rekomenduojamas vilkių skaičius

Table 1.6. Recommended tug quantity in Omisalj port

| Laivo ilgis LOA, m | Vilkių skaičius laivui įplaukiant į uostą | Vilkių skaičius laivui išplaukiant iš uosto |
|--------------------|---|---|
| Iki 180 | 2 | 1 |
| 180–240 | 3 | 2 |
| 240–280 | 4 | 2 |
| Daugiau kaip 280 | 5–6 | 3 |

Nurodymų dėl vilkių naudojimo Splito (*Split*) uoste nėra, tai priklauso nuo locmanų ir kapitonų praktinės patirties bei esamos situacijos įvertinimo, galutinį sprendimą dėl būtino vilkių skaičiaus ir traukimo jėgos priima uosto kapitonas. Taigi bent vienas vilkikas visada bus pasitelkiamas kiekvienam laivui įplaukiant į uostą ir išplaukiant iš jo, jei leidžia oro sąlygos.

Dalis tarptautinių dokumentų, reglamentuojančių vilkių naudojimą uostuose: GL Noble denton ND 0030 (GL Noble Denton 2013); Ship-port interface guide (IMO 2021b); Resolution A. 1155(32) Procedures for Port (IMO 2021a); SOLAS chapter V on “Safety of Navigation” (International Maritime Organization 2002).

1.7 lentelė. Laivybos navigacinį saugumą reglamentuojančių tarptautinių dokumentų palyginimas

Table 1.7. Different international documents related with marine navigation safety comparison

| Laivybos saugumą reglamentuojantys tarptautiniai dokumentai | Vėjo poveikis | Vėjo krypties poveikis | Srovės poveikis | Poveikis, atsižvelgiant į laivo ilgį | Seklumos poveikis | Bangų poveikis | Bendro pobūdžio rekomendacijos |
|---|---------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|
| GL Noble denton ND 0030 (2010) | + | | + | | | + | + |
| Ship-port interface guide Availability of tug assistance (MSC.1/Circ.1101/REV.3) (IMO 2021) | | + | | + | | | + |

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

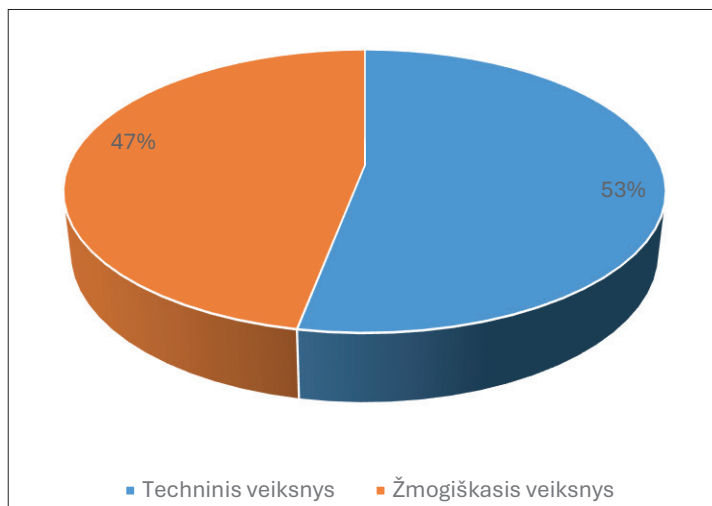
| Laivybos saugumą reglamentuojantys tarptautiniai dokumentai | Vėjo poveikis | Vėjo krypties poveikis | Srovės poveikis | Poveikis, atsižvelgiant į laivo ilgį | Seklumas poveikis | Bangų poveikis | Bendro pobūdžio rekomendacijos |
|---|---------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------------|
| Resolution A. 1155(32) Procedures for Port State Control (IMO 2021) | + | | | | | + | + |
| SOLAS chapter V on "Safety of Navigation" (2002) | + | | | | | + | + |
| Siūloma metodika | + | + | + | + | + | + | + |

Pagrindiniai laivybos saugumą reglamentuojantys dokumentai dažnai neapima konkrečių techninių ir metodinių nurodymų, kaip įvertinti būtina vilkikų traukos jėgą ir skaičių, siekiant užtikrinti saugumą uoste vykdant vilkimo operacijas skirtingomis meteorologinėmis ir hidrometeorologinėmis sąlygomis. Vyraujanti pasaulio uostų praktika, kai parinkdami būtina vilkikų skaičių ir jų traukos jėgą, uostai taiko skirtingus kriterijus bei dažnai nelabai tevertina arba iš viso neįvertina meteorologinių sąlygų, tokių kaip vėjo ir srovės kryptis, lemia būtinybę tikslinti vilkikų traukos jėgos ir jų skaičiaus nustatymo metodiką, siekiant užtikrinti uosto saugumą. Situacijos, kai uostai vadovaujasi skirtingais vilkikų traukos jėgos ir jų skaičiaus parinkimo kriterijais, bei taiko skirtingus skaičiavimo metodus, neužtikrina navigacinio laivybos saugumo, ypač esant ribinėms meteorologinėms sąlygoms, ir apsunkina laivų kapitonų sprendimų priėmimą bei palieka nelaimių tikimybę. Taigi metodiniai nurodymai turėtų būti universalūs ir lengvai pritaikomi kiekviename uoste.

1.4. Vilkių darbo uoste analizė

Pagrindinės galimos uosto vilkių darbo rizikos, tyrėjų teigimu, gali būti taip skirstomos: žemas darbuotojų kvalifikacijos lygis; prasta uosto vilkių techninė būklė; prasta vilkių įrangos būklė; netinkama laivo ir vilkiko įgulų narių komunikacija vykdant operacijas dėl kalbos barjero; netinkamas operacijos planavimas; menki darbo saugumo įgūdžiai. Remiantis Indijos mokslininkų atliktų tyrimų rezultatais, dažniausiai pasitaikantys rizikos veiksniai Indijos uostuose ir jų dažnumas (procentais) pateikti grafike (Abhijit 2016).

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė



1.1. pav. Rizikos veiksnių, lemiančių vilkikų nelaimingus atsitikimus uostuose, pasiskirstymas

Techninis veiksnys: neteisingas vilkimo metodo taikymas, neteisingai įvertintos gamtinės sąlygos, prastas vilkiko valdymas, vilkimo plano nebuvimas, prasta vilkikų techninė būklė. Žmogiškasis veiksnys: prastai apmokyta įgula, žmogiškoji klaida, prasta įgulos narių ir ločmano komunikacija, žemas darbo kultūros lygis.

Fig. 1.1. Risk factors distribution which impact tug accidents in ports clasified

Technical aspects: wrong tug method used, miscalculating meteo conditions, poor handling of tug, wrong tug schedule planing, poor technical conditions of tug. Human factor: poor training of tug crew, human mistake during operation, poor comunication between vessel and tug crew, bad working atmoshpehre.

Panašūs ir Graikijos bei Turkijos mokslininkų atliktų tyrimų rezultatai (žr. 1.8 lentelę) (Fiskin, Cakir ir Sevgili 2021; Sinanaj 2014). S. Sinanaj (2014) tyrime daug dėmesio skirta žmogiškojo ir techninio veiksnių poveikiui, vilkimo operacijas vykdančiams vilkikams patyrus nelaimingą atsitikimą, nesikoncentruojant ties meteorologinių ir hidrologinių veiksnių poveikiu, kurio mokslininkai, tyrimą atlikę apklausos būdu, praktiškai nevertino, tačiau pateikė (žr. 1.2 pav.) išplėstinio tyrimo rezultatus detalai suskirstę nelaimių priežastis pagal nelaimingo atsitikimo tipą, vietą, operacijos sąlygas atskleidžia, kad prastos oro sąlygos ir tapo pagrindine avaringumo ir nelaimingų atsitikimų priežastimi.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

1.8 lentelė. Pagrindinių vilkikų nelaimių priežasčių pasiskirstymas

Table 1.8. Tug boats accidents distribution

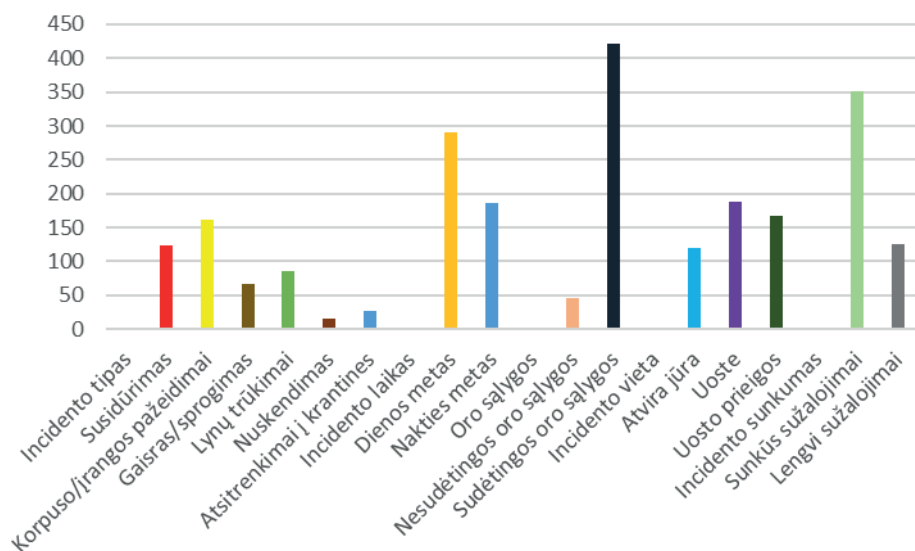
| Pagrindinės nelaimingų atsitikimų priežastys | Dažnumas nuo bendro įvykių skaičiaus, % |
|--|---|
| Trūksta patirties / kompetencijos / žinių | 23 |
| Vilkiko įrangos mechaninis gedimas | 21,3 |
| Darbo tvarkos ir procedūrų pažeidimai | 14,8 |
| Prasta vilkiko ir aptarnaujamo laivo įgulos narių komunikacija | 13,1 |
| Aplaidumas | 8,2 |
| Nuovargis | 6,6 |
| Netinkamas operacijos planavimas ir pasiruošimas jai | 4,9 |
| Prastos oro sąlygos | 3,3 |
| Kitos priežastys | 4,8 |
| Iš viso: | 100 % |

Turkų mokslininkai išanalizavo 477 vilkikų avarijų 2008–2017 m. laikotarpiu įrašus iš informacijos tvarkymo paslaugų duomenų bazės (angl. *Information handling system* – IHS SeaWeb) (S&P Global 2024). Tyrimas atskleidė, kad senesni nei 20 metų vilkikai sudaro didžiausią į nelaimes patenkančių vilkikų skaičiaus dalį nuo bendros tyrimų imties, palyginus su 10-ties metų ir naujesniais vilkikais. Be to, nustatyta, kad korpuso / įrenginių apgadinimas ir susidūrimo tipo avarijos sudaro daugiau kaip pusę visų fiksuotų vilkikų avarijų (Çakır, Fişkın ir Bayazit 2017).

Kitas svarbus uosto saugumo aspektas – vilkimo operacijos planavimas. Iš anksto nesuplanuotas vilkimo procesas, kuriam tinkamai nepasiruošta, atsižvelgiant į laivo gabaritus, specifiką ir hidrometeorologines sąlygas, yra svarbus veiksnys, kuriam tenka 80 % laivų nelaimių priežasčių nuo bendros tirtos imties (Yıldırım, Başar ir Uğurlu 2019). Verta pažymėti, kad tokie nepalankūs veiksniai, kaip blogos oro sąlygos ir prastas matomumas, vykdant vilkimo operacijas dažnai pasitaikanti nelaimių priežastis, kuriai tenka 20 % atvejų nuo visos tyrimo imties (Bye ir Gilberg 2018).

Uostuose ypač svarbu mažinti nelaimingų atsitikimų riziką. Efektyvus ir tinkamas uosto vilkikų naudojimas, be abejo, pagerintų navigacinę saugumo situaciją uoste. Daugelyje šiuolaikinių uostų šiandien veikia įvairių tipų ir skirtingos galios uosto vilkikai. 1.9 lentelėje pateiktos Klaipėdos uosto vilkikų, aptarnaujančių uoste besilankančių įvairių tipų ir dydžių laivų, techninės charakteristikos.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė



1.2 pav. Rizikos veiksnių uostuose pasiskirstymas

Fig. 1.2. Distribution of risk factors in ports

1.9 lentelė. Klaipėdos uoste dirbantys vilkikai

Table 1.9. Active working tugs in Klaipėda port

| Vilkiko pavadinimas | Ilgis (LOA) | Plotis | Grimzlė | Variklio galia | Vilkiko traukimo jėga |
|---------------------|-------------|--------|---------|----------------|-----------------------|
| KLASCO1 | 29,44 m | 10,1 m | 4,6 m | 3370 kW | 550 kN |
| KLASCO2 | 29,44 m | 10,1 m | 4,6 m | 3370 kW | 550 kN |
| KLASCO3 | 27,9 m | 9,8 m | 4,6 m | 3728 kW | 600 kN |
| TAK4 | 26,39 m | 8,8 m | 4,8 m | 1297 kW | 300 kN |
| TAK5 | 24,22 m | 8,8 m | 4,8 m | 1297 kW | 350 kN |
| TAK6 | 26,61 m | 9,5 m | 4,8 m | 3430 kW | 550 kN |
| TAK10 | 28,67 m | 10,4 m | 4,6 m | 3728 kW | 610 kN |
| TAK11 | 28,64 m | 10,4 m | 4,7 m | 3728 kW | 610 kN |
| SL TENGIZ* | 48 m | 13 mm | 4,6 m | 2880 kW | 500 kN |

Pastaba: SL TENGIZ aptarnauja tanklaivius prie Būtingės terminalo švartavimosi plūduro SPM (angl. *single mooring point* – SPM).

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Klaipėdos uostą 2022 metais aplankė 5605 laivai, iš jų 4274 vykdė krovą, šis skaičius pastaraisiais metais dėl geopolitinių priežasčių ir COVID-19 pandemijos gerokai sumažėjęs. Nusistovėjęs pastarųjų trejų metų vidurkis nuo 2019 metų – 6500 laivų, iš kurių maždaug 4800 vykdė krovą (Klaipėdos uostas 2024). Įvertinus vilkikų apkrovos dinamiką Klaipėdos uoste, galima konstatuoti, kad vidutiniškai per metus atliekama maždaug 4 tūkst. įvairių vilkimo operacijų, vienos operacijos vidutis laikas – 1,5 valandos, vilkimo operacijoje dalyvaujančių vilkikų skaičius pasiskirsto taip: 60 % bendro vilkimo operacijų skaičiaus aptarnauja du vilkikai; 20 % – trys; 15 % – vienas; 5 % – keturi, pagrindiniai aptarnaujami laivai – 200–250 metrų ilgio sausakrūviai laivai ir naftos tanklaiviai. Vilkimo operacijos valandos kaina – vidutiniškai 5 tūkst. Eur. Dažniausiai pasitaikantis vilkiko tipas – ASD 60T (600 kN) galios. Vilkikas, vieną valandą veikiantis traukimo-stūmimo (angl. *push-pull*) režimu, naudodamas 50 % variklių galios, vidutiniškai išskiria 248,1 CO mg/Nm³ (g/hp-h) bei sunaudoja 220 L/h dyzelinio kuro (CAT, n. d.). Kadangi daugelis į uostus atplaukiančių laivų papildomų pavairavimo mechanizmų neturi, jiems saugiai manevruoti uoste, prisišvartuoti ir atsišvartuoti padeda uosto vilkikai. Dažniau papildomų pavairavimo mechanizmų neturi sausakrūviai laivai, naftą ir dujas gabenantys tanklaiviai, daugelis konteinerinių laivų, būtent jie ir sudaro pagrindinį uostą lankančių laivų skaičių. Klaipėdos uoste reguliariai besilankantys laivai jų tipo aspektu pasiskirsto taip: generalinių krovinių (34 %); gabenantys naftos ir chemines medžiagas (13 %); konteineriniai (13 %); biriųjų krovinių (9 %), krovininiai / konteineriniai (4 %). Didžiausias Klaipėdos uoste apsilankęs laivas buvo 399 metrų ilgio, maksimali į Klaipėdos uostą atplaukusio laivo grimzlė – 13,4 m, maksimalus dedveitas – 202 036 t (Lietuvos statistikos departamentas, n. d.).

Pasaulyje priskaičiuojama apie 21 tūkst. veikiančių vilkikų, kuriems tenka 40 milijonų tonų, arba 4 %, viso laivybos sektoriaus kasmet išmetamo CO₂ kiekio. 2023 metais publikuotoje Baltijos jūros nelaimingų atsitikimų suvestinėje bendras nelaimių Baltijos jūros uostuose skaičius siekia 69 (European Maritime Safety Agency 2023). Fiksuoti nelaimingi atsitikimai skirstomi į šias grupes: užplaukimas ant seklumos; atsitrenkimas į krantinę; susidūrimas su kitais laivais ar vilkikais. Klaipėdos uoste 2023 m. fiksuotas nelaimingų atsitikimų skaičius siekia 8, iš kurių: 6 – atsitrenkimas į krantinę ar susidūrimas su kitais laivais; 2 – nepatikslinti laivų apgadinimai. 70 % nelaimės patyrusių laivų sudaro sausakrūviai krovininiai ir konteineriniai laivai, incidento vieta – uostas ir jo prieigos. Šie duomenys atitinka 2018 metais HELCO ataskaitoje apie Baltijos jūroje fiksuotus laivybos nelaimingus atsitikimus pateiktus duomenis (HELCOM 2018). Jai remiantis bendras laivybos intensyvumas pasaulio uostuose plečiantis prekybai pasaulio mastu didėja, kartu uostams kyla vis naujų saugumo iššūkių, siekiant kuo greičiau ir veiksmingai aptarnauti laivus (United Nations 2023). Didėja ir vilkikų efektyvaus darbo planavimo, būtinos traukos jėgos ir vilkikų skaičiaus apskaičiavimo metodikos tobulinimo poreikis, siekiant uostuose gerinti laivybos navigacinį saugumą tiksliai nustatius būtiną vilkikų traukos jėgą ir skaičių,

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

ypač esant ribinėms laivybos sąlygoms, tokioms kaip stiprus vėjas, pavojingos srovės, mažas gylis.

Kad tinkamai ir saugiai galėtų atlikti numatytas funkcijas, uoste veikiančio vilkiko galia turėtų būti didesnė už vykdant operaciją susidariusias išorines jėgas. Šiuo atveju ypač svarbu taikyti tinkamus metodus, kurie leistų įvertinti ir apskaičiuoti išorines bei vilkiko sukuriamas laivą konkrečiu metu ir esant konkrečioms sąlygoms veikiančias jėgas bei pateikti rekomendacijų dėl optimalaus vilkikų skaičiaus ir jų galios, tai galėtų kompensuoti susidariusias išorines jėgas, siekiant saugiai atlikti operaciją. Šiame darbe pateikta skaičiavimo metodologija įvertina išorines jėgas ir momentus, kurie veikia laivą jam manevruojant uoste, be to, ir vilkiko sukurtas jėgas bei momentus. Vilkimo operacijos sudėtingomis sąlygomis atvejo analizė pagrindė taikytą teorinį metodą. Laivui švartuojantis ir atsišvartuojant būtina tiksliai apskaičiuoti papildomas jėgas bei momentus, kurie leistų kompensuoti išorines jėgas ir taip pagerintų uosto saugumo situaciją.

Laivybos nelaimių tyrimus Lietuvoje vykdo Transporto avarijų ir incidentų tyrimo skyrius prie LR teisingumo ministerijos. Laivų avarijų ir incidentų tyrimų vadovas, remdamasis Europos jūrų laivų avarijų informacine baze (angl. *Europe Marine Casualty Information Platform* – EMCIP), praneša apie kiekvieną laivo avariją ar incidentą ir pateikia išsamią informaciją Europos Komisijai. Tokią informaciją teikia visos Europos Sąjungos laivų avarijų saugos tyrimo įstaigos. Sukaupti duomenys leidžia stebėti saugios laivybos tendencijas ir nustatyti laivybos saugos užtikrinimo sritis, kur būtina imtis veiksmų (European Maritime Safety Agency 2023). 2022 metais Klaipėdos uoste ir jo prieigose įvyko 38 laivybos incidentai, iš kurių vienas – labai sunki avarija, vienas – sunki avarija ir 30 – nesunkių avarijų. Atitinkamai 2021 metais vienas iš incidentų – labai sunki, vienas – sunki ir 26-šios – nesunkios avarijos. Sunkumo aspektu avarijos taip skirstomos:

- Labai sunki, kai žūsta žmogus, laivas arba padaroma didelė žala gamtai.
- Sunki – tai laivų susidūrimas, laivo užplaukimas ant seklos, jo atsitenkimas į kitą objektą, gaisras, sproginimas laive, didelė žala gamtai.
- Nesunki, kai nepadaroma žala žmogui, laivo įrangai ir uosto infrastruktūrai.

Pastarųjų metų avarijų Klaipėdos uoste atvejai susiję su netinkamu meteorologinių sąlygų, vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos įvertinimu arba apskritai vilkikų, kurie galėjo užtikrinti uosto navigacinį saugumą, nepasitelkimu. Keletas incidentų Klaipėdos uoste pavyzdžių pateikti 1.10 lentelėje.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

1.10 lentelė. Nelaimingi atsitikimai Klaipėdos uoste

Table 1.10. Accidents in Klaipėda port

| Metai | Nelaimingo atsitikimo aprašymas | Išvados |
|------------------------|---|---|
| 2021 m. spalio 1 d. | Krovininis laivas „CL Tomo“, esant tirštam rūkui plaukdamas Klaipėdos valstybinio jūrų uosto kanalu uosto vartų link, prasi- lenkdamas su įplaukiančiu keleiviniu laivu „Patria Seaways“, susidūrė su prie krantinės nr. 4 prišvartuotu biriojo kro- vinio laivu „Melinda“ ir prie krantinės nr. 3 prišvartuotu cheminių medžiagų bei naftos produktų tanklaiviu „PS Houston“, kuris registruotas Maltoje. Laive „CL Tomo“ įvykus avarijai jame buvo locmanas. Susidūrimo metu pažeisti laivų „CL Tomo“, „Melinda“ ir „PS Houston“ korpusai bei jų komponentai, kurie neturėjo poveikio šių laivų eksploatacinėms charak- teristikoms. Susidūrimo metu nutraukti laivo „PS Houston“ švartavimo lynai, pažeista kranto infrastruktūra. Po avarijos laivas „PS Houston“, pasitelkus du vilkikus, vėl prišvartuotas prie krantinės | Incidentas kilo dėl laivo valdymo trūkumų, prastos locmano, vilkiko ir kapi- tono tiltelio įgulos narių tarpusavio komunikacijos. Įvertintos meteorologinės sąlygos, techniniai laivo valdymo ypatumai ir Uosto direkcijos tarnybų veiksmai |
| 2020 m. rugpjūčio 6 d. | Laivas „Pearl Island“ vilkikams paded- ant švartavosi prie Klaipėdos valstybinio jūrų uosto krantinės. Jame buvo locmanas. Švartuodamasis jis atsitrenkė į krantinės atmušą, dėl to įlinko laivo korpusas ir pažeista balastinio vandens cisterna bei šiek tiek pažeisti uosto įrenginiai | Avarija įvyko dėl prastos locmano, laivo „Pearl Is- land“ tiltelio komandos narių ir vilkiko laivavedžio komunikacijos, laivą „Pearl Island“ švartuojant prie krantinės, prasto laivo ir vilkiko valdomumo bei netinkamo jų manevrinių savybių įvertinimo |

Reali situacija atskleidžia, kad net ir esant palankioms laivybos sąlygoms dėl tech- ninio gedimo ar žmogiškojo veiksnio gali susiklostyti situacija, kai laivui praradus kontrolę susidaro pavojinga situacija, kuri gali baigtis laivo ar infrastruktūros apgadi- nimu, ekologine avarija ar kitais nuostoliais. Iš incidentų ataskaitų matyti, kad jų prie- žastys kompleksinės: netinkamas nepalankių sąlygų įvertinimas gali lemti įvairaus pobūdžio avarijas ir incidentus uosto akvatorijoje.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

Situacijos, kai sutrikus laivo energijos šaltiniams užgęsta jo variklis ir prarandama valdymo kontrolė (angl. *Black out*), yra vieni dažniausiai pasitaikančių kritinių gedimų laivuose (Lloyd's List Intelligence 2024). Tokios situacijos pavojingos tiek laivui esant uosto prieigose, tiek jam manevruojant uoste ir gali lemti didžiulius nuostolius: sutrikdyti laivybą, padaryti žalą uosto infrastruktūrai ar aplinkai (1.3 pav.). Minėtus incidentus gali lemti žmogiškoji klaida, mechaninis laivo gedimas arba laivą veikiančios nepalankios meteorologinės sąlygos.



1.3 pav. Kairėje pusėje – konteinerinis bendrovės „Evergreen“ laivas „Ever Given“ užtvėrė Sueco kanalą, dešinėje pusėje – sausakrūvis laivas „Ocean Crow“, išplukdytas į Klaipėdos paplūdimį (BBC news ir lrytas.lt nuotraukos)

Fig. 1.3. On the left side container vessel „Ever Given“ of the company „Evergreen“ block the Sueco canal, right side bulk carrier vessel „Ocean Crow“ floated to Klaipėda beach (photo BBC news and lrytas.lt)

Vilkikų palydos ir asistavimo svarbą iliustruoja 2024-03-24 Baltimorėje (JAV) įvykęs incidentas, kai konteinerius gabenančiame laive „Dali“ įvykus gedimui laivas prarado kontrolę ir rėžėsi į Franciso Scotto Key tilto atramą bei jį sugriovė. Per šį nelaimingų atsitikimą ne tik sugadinta strateginė infrastruktūra, bet ir žuvo šeši žmonės. Kita panaši situacija taip pat įvyko JAV, kai konteinerinis laivas „Qingdao“, palikdamas GCT New York terminalą ir artėdamas prie Verrazzano Narrowso tilto, sugedus varikliui prarado galią bei valdomumą, bet saugiai nuplukdytas į inkaravimosi vietą, nes laivą lydėjo vilkikai, kurie prieš tai aprašytu Baltimorės uosto atveju nebuvo privalomi (1.4 pav.).

Aprašytos situacijos atskleidžia vilkikų būtinybę, siekiant užtikrinti uosto saugumą ir išvengti galimų nelaimingų atsitikimų pasekmių – nelaimių, žūčių, uoste ir jo prieigose manevruojant įvairių tipų laivams. Situacijose, kai vykdomos laivų gelbėjimo operacijos juos lydėjo vilkikai, daugeliu atvejų, įvykus laivo avarijai, vilkikams suvaldyti avarinę situaciją pavyksta, priešingai nei situacijose, kai laivų uosto teritorijoje ar jo prieigose vilkikai nelydi.

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė



1.4 pav. Kairėje pusėje – į Baltimorės tiltą įvykus gedimui atsitrenkęs konteinerinis laivas „Dali“. Dešinėje – laivo „APL Qingdao“ plaukimo trajektorija, remiantis AIS duomenimis, kai sugedus laivo varikliui, pasitelkus vilkikus, išvengta susidūrimo su tiltu („Scanpix“ ir „The Maritime executive“ nuotraukos)

Fig. 1.4. On the left side container vessel “Dali” collision with Baltimore bridge after black out situation. On the right side maneuver trajectory according AIS data after black out situation when tug help handle vessel and avoid collisions (photo *Scanpix* and *Maritime executive*)

Praktinių rekomendacijų ir metodikos dėl optimalių vilkikų skaičiaus ir jų galios trūkumas gali lemti nepagrįstą riziką arba perteklinių priemonių taikymą realiose situacijose. Pagrindinis šio tyrimo uždavinys – išnagrinėti ir pasiūlyti praktinius metodus bei optimalius sprendimus, kaip kuo efektyviau naudoti vilkikus uostuose ir mažinti galimas rizikas laivams manevruojant sudėtingomis sąlygomis.

1.5. Pirmo skyriaus apibendrinimas

Lietuvos ir užsienio šalių mokslininkai yra atlikę nemažai tyrimų uosto saugumo klausimais, siekdami nustatyti optimalų vilkikų skaičių ir jų traukos jėgą vykdant uosto operacijas, bet pasigendama tikslių vilkikų traukimo jėgos ir jų skaičiaus vertinimo tyrimų, ypač esant nestandartinėms ir ribinėms situacijoms, tokioms kaip sudėtingos meteorologinės sąlygos, kai tenka įvertinti vėjo, srovės ir seklumos poveikį, staiga sugedus laivų varikliui ar būtina suvaldyti situaciją, siekiant padėti saugiai pasiekti apsisukimo baseiną ar švartavimosi krantinę.

Remiantis laivų manevringumo modelių tyrimų rezultatais, galima simuliuoti laivų judėjimą, siekiant įvertinti, kaip skirtingų tipų laivai juda skirtingomis sąlygomis, veikiami hidrodinaminių ar kitų išorinių ir vidinių jėgų. Šie tyrimai prisideda prie uosto navigacinio saugumo užtikrinimo, žinių ir kompetencijų bazės, kurių pagrindu formuojama uosto infrastruktūra, kūrimo, siekiant tobulinti vilkikų kapitonų kompetenciją jiems praktikuojantis su simulatoriais ir pasitelkus naujausias žinias dirbant realiomis sąlygomis. Visa tai leidžia suvokti laivų manevravimo dinamiką. Taigi galima teigti, kad vilkikų manevringumo tyrimai ypač reikšmingi, siekiant gerinti laivų

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

manevringumą įvertinus jų manevravimo dinamiką ir taip užtikrinant navigacinį saugumą uoste (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2023; Gil, Montewka ir kt. 2020).

Svarbus aspektas yra vilkikų manevrinės savybės priešvartuojant ir atšvartuojant laivus prie krantinės, nes jie veikia įvairiomis meteorologinėmis sąlygomis ir skirtingose uosto vietose, pvz., siauruose uosto kanaluose, tad norit saugiai įvykdyti užduotį priešvartuojant, atšvartuojant ar vykdant kitas operacijas būtina užtikrinti maksimalų vilkiko manevringumą ir traukos jėgą. Daugelis laivų dėl savo gabaritų, neturėdami papildomų pavairavimo mechanizmų, dažnai negali manevruoti uostuose be vilkikų, kurie padeda jiems apsisukti, prisišvartuoti ar atsišvartuoti, laisvai manevruoti uosto teritorijoje, tad siekiant užtikrinti laivų manevringumą būtina tirti efektyvias vilkikų naudojimo schemas ir gerinti jų pačių manevrines savybes. Tuo tikslu atliekami tyrimai, siekiant tobulinti vilkiko traukos jėgos ir manevringumo technologijas, įvertinti laivų manevravimo mechanizmus (sraigto, azimuto variklis ir kt.) bei optimizuoti jų manevringumą. Šių tyrimų tikslas – gerinti vilkikų manevringumą efektyviai išnaudojant turimą propulsinį pajėgumą, kartu mažinti vilkimo operacijos laiko ir energijos sąnaudas (Nitonye, Adumene ir Howells 2017).

Remiantis atlikta Lietuvos ir užsienio šalių mokslininkų literatūros analize, galima teigti:

- uosto vilkikų naudojimo optimizavimo problema yra aktuali, tad būtina tęsti tyrimus šia tematika;
- spręstinas uosto vilkikų naudojimo optimizavimo klausimas, siekiant mažinti sąnaudas;
- tarptautiniuose norminiuose dokumentuose konkrečiai taikytina vilkikų traukos jėgos ir jų skaičiaus skaičiavimo metodika nenurodyta, pateiktos tik bendros saugumo gairės, tad būtina tikslinti taikytinus laivybos saugumą vykdant vilkimo operacijas užtikrinančius metodus ir priemones, parinkti optimalų vilkikų skaičių bei jų traukos jėgą esant konkrečioms laivybos sąlygoms;
- pasaulio uostuose galioja skirtingos į uostą atvykstančių ir iš jo išvykstančių laivų aptarnavimo, būtino vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos parinkimo tvarkos bei taisyklės, parengtos atsižvelgiant į uosto dydį, akvatorijos bei krantinių išsidėstymą, vyraujančias meteorologines ir hidrologines sąlygas;
- šiandien taikomi matematiniai modeliai netiksliai įvertina vilkikų sąveiką su laivu esant sudėtingoms navigacinėms sąlygoms. Nesant patikimos informacijos, kaip šie pavieniai veiksniai ar jų visuma veikia vilkimo operaciją, kyla galimų nelaimių ar incidentų rizikų, priėmus netinkamus sprendimus dėl vilkimo plano, parenkant būtiną vilkikų skaičių ir jų traukos jėgą;
- mokslinių straipsnių apžvalga atskleidė problemas ribinio dydžio laivus priimančiuose uostuose, siekiant užtikrinti jų saugų manevravimą, bei situacijas, kai nenustačius reikiamo vilkikų skaičiaus intensyvią laivybą vykdančiuose uostuose susiklosto situacijos, kai operacijos užtrunka ilgai, arba parinkus per

1. Laivo manevrinių galimybių ir uosto vilkikų naudojimo mokslinių tyrimų bei tarptautinių reikalavimų analizė

mažai vilkikų kyla saugumo problemų, o parinkus per daug jų gali trūkti vykstant kitas operacijas.

- Lietuvoje uosto vilkikų tyrimų vykdymo, siekiant įgyvendinti disertacijoje išsikeltus tikslus, mokslo tiriamoji bazė yra pakankama.

Remiantis disertacijos autoriaus atlikta analize galima teigti, kad vilkimo operacijos sėkmę lemia šie tinkamai parinkti ir įvertinti techniniai bei organizaciniai kriterijai:

- tinkamos galios vilkikų parinkimas;
- optimalaus vilkimo metodo taikymas;
- vilkimo įrangos ir jos galimybių įvertinimas konkrečios vilkimo operacijos vykdymo aspektu.

Ne mažiau svarbu atsižvelgti ir į išorinių veiksnių poveikį, kuris lemia laivo manevringumą uoste. Paprastai tai gamtinės ir meteorologinės sąlygos, kurias būtina įvertinti planuojant uoste vykdyti vilkimo ir pagalbines operacijas, – tai vyraujantys vėjai, bangavimas ir srovės.

Pasitelkus turimus matavimo įrenginius, mokomąjį simulatorių, atliktus matematinis skaičiavimus ir praktinius bandymus, vykdomi visapusiški tyrimai, kuriais siekiama šalinti taikomų matematinių vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos skaičiavimo modelių trūkumus, be to, spręsti praktines laivybos saugumo, vilkikams padedant laivams manevruoti uosto akvatorijoje, vykdyti atšvartavimo ir prišvartavimo operacijas, užtikrinimo užduotis. Tiksliai įvertinus meteorologines ir hidrometeorologines sąlygas būtų galima mažinti incidentų bei nelaimių skaičių. Remiantis apžvalgoje pateikta statistika galima teigti, kad minėtų sąlygų neįvertinimas vykstant vilkimo operacijas yra viena dažniausiai pasitaikančių nelaimių priežasčių – ne mažiau kaip 50 %, palyginti su kitomis nelaimių priežastimis. Verta pažymėti, kad incidentai ir susidūrimai vykstant vilkimo operacijas gali lemti įrangos bei infrastruktūros sugadinimą (neišlaikant stiprumo, pvz., vilkimo lyno, kriterijų), įgulos narių sveikatos sutrikdymą, kai vykstant vilkimo operaciją trūkus vilkimo lynui sužeidžiami ant denio dirbę žmonės, taigi būtinos vilkikų traukos jėgos ir jų skaičiaus nustatymo metodologijos tobulinimas gali visapusiškai pagerinti saugumo situaciją uoste ir mažinti galimas rizikas.

Remiantis šiomis išvadomis ir apibendrinimais suformuoti disertacijos darbo tikslai ir uždaviniai.

Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Siekiant užtikrinti uosto saugumą naudojami įvairios paskirties ir tipų vilkikai, tai leidžia didinti laivų manevravimo parametrus (galimybes) plaukiojant ir manevruojant uostuose.

Neturint pakankamai duomenų, bet esant praktinei būtinybei įgyvendinti disertacijos tikslus ir uždavinius būtina:

- nustatyti veiksnius, kurie užtikrina laivybos saugumą uosto sąlygomis;
- sukurti praktiškai veiksmingą analitinį metodą;
- atlikti sukurto metodo verifikaciją;
- apibendrinti ir parengti praktiniam naudojimui tinkamus metodologinius nurodymus.

Siekiant nustatyti realius laivo manevravimo uoste parametrus, esant mažam gyliui, būtina sukurti ir eksperimentiniais tyrimais patikrinti laivų manevravimo galimybes su realiais laivais realiomis uosto sąlygomis, pasitelkus vilkikus bei naudojantis kalibruotu simulatoriumi. Atlikti eksperimentiniai laivo manevravimo parametrų realiomis sąlygomis, laivui plaukiant į uostą ir manevruojant jame, tyrimai naudojant vilkikus leido įsitikinti disertacijos autoriaus sukurto metodo patikimumu. Šiuolaikiniuose uostuose naudojami universalūs plačios paskirties vilkikai, galintys atlikti ne tik vilkimo ir tempimo operacijas asistuojant į uostą įplaukiantiems bei iš jo

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

išplaukiantiems laivams, dalyvaujantys prišvartuojant ir atšvartuojant laivus įvairiomis sąlygomis, bet ir gebantys atlikti kitas funkcijas, tokias kaip gaisrų likvidavimo darbai, gelbėjimo operacijos, ledo laužimas uosto akvatorijoje, išsiliejusių teršalų likvidavimo operacijos. Esant tokiam plačiam šiuolaikinių vilkikų pritaikymui uoste iš dalies atsisakoma siauros paskirties uostą aptarnaujančių laivų. Apimant visas šias vilkikų funkcijas akivaizdu, kad jų svarba uosto saugumui gerokai išauga.

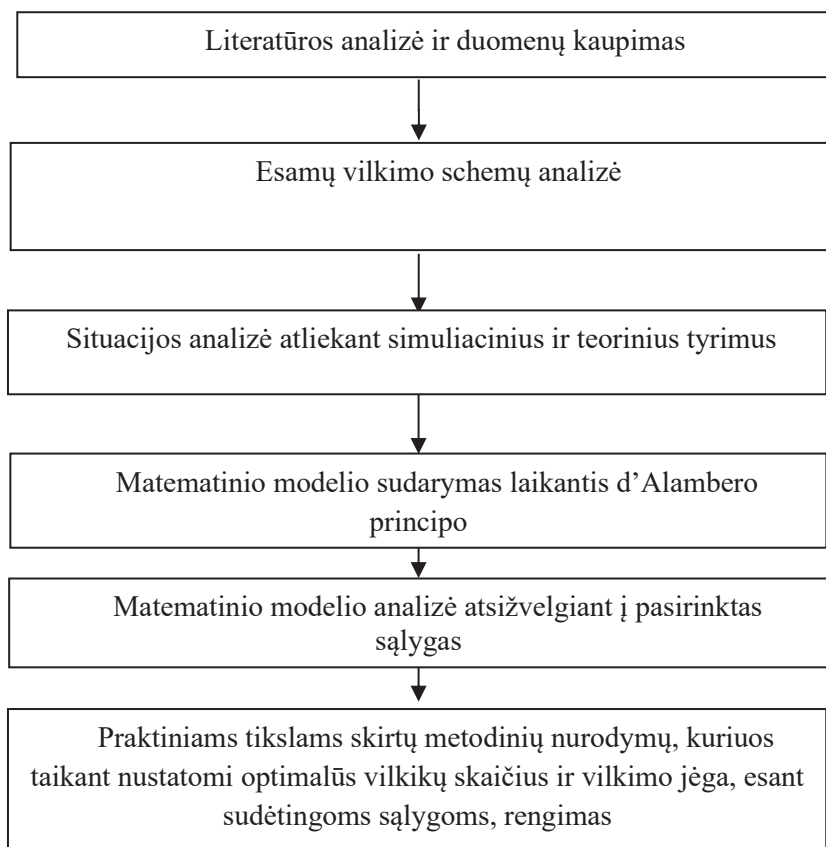
Dažniausiai vilkikai klasifikuojami pagal šias kategorijas: traukimo jėgą, propulsijos tipą, funkcionalumą, ledo klasę. Paprastai vilkikų traukos jėga prasideda nuo 50 kN (mažuose uostuose) iki 700–1000 kN dideliuose uostuose, kurie aptarnauja didžiausius E ar G klasių konteinerinius laivus, SUEZMAX klasės ar didesnius naftos tanklaivius, sausakrūvius ar kitos paskirties laivus, kurių ilgis siekia 300 ir daugiau metrų. Šiandien uostuose dažniausiai naudojami populiariausios traukimo jėgos – 500–600 kN – vilkikai. Pavyzdžiui, Klaipėdos uoste, kuriame kraunama iki 48 mln. tonų krovinių per metus ir į uostą įplaukia daugiau kaip 6500 skirtingų, tarp jų ir G bei E klasių konteinerinių, laivų, SUEZMAX ir didesnių naftos tanklaivių, šioms operacijoms šiuo metu uoste naudojami aštuoni vilkikai, kurių traukimo jėga siekia iki 650 kN (Shipowners 2015; Maritime and Port Authority of Singapore 2024).

2.1. Vilkikų darbo uoste tyrimas ir metodinių sprendinių algoritmo sudarymas

Siekiant sukurti tyrimo metodiką, atliktas pirminis duomenų kaupimas, analizė, situacijos vertinimas. Išanalizavus turimą literatūrą ir mokslinius šaltinius bei atlikus jų apžvalgą, sukaupia ir susisteminta informacija temos naujumo, saugumo iššūkių, su kuriais susiduria operacijas vykdančios vilkikai, metodų, kaip parenkami optimalūs vilkikų skaičius ir traukimo jėga, žmogiškojo veiksnio poveikio, siekiant uoste užtikrinti darbo saugą, saugaus manevravimo ir kitais aspektais. Metodika kurta remiantis literatūros šaltiniuose pateiktais duomenimis, laivų judėjimo uoste stebėjimais ir teoriniais bei eksperimentiniais tyrimų rezultatais, kurie gauti iš vilkikus valdančių bendrovių.

Šiame tyrime siekiama sukurti ir pateikti optimalaus vilkikų skaičiaus bei jų traukimo jėgos parinkimo metodinius nurodymus, kurie parengti atsižvelgus į sudėtingas meteorologines sąlygas, vėjo, srovės, bangavimo ir mažo gylio poveikį, siekiant užtikrinti saugų ir sklandų darbą vykdančias atšvartavimo bei prišvartavimo operacijas ir saugų laivų manevravimą uosto akvatorijoje. Šiuo atveju įvertinti pagrindiniai parametrai: hidrodinaminiai, krantinės, vilkimo lynų, laivų bei vilkikų dydžio, vilkikų traukos jėgos, vėjo ir srovės greičio bei krypties, uosto gylio, vilkimo schemos ir kt.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.1 pav. Tyrimo algoritmas

Fig. 2.1. The algorithm of the research

Siekama, kad taikant parengtus metodinius nurodymus būtų atsižvelgiama į hidrometeorologines ir hidrologines laivų bei vilkikų plaukiojimo sąlygas, pvz., vėjo, srovės greitį, vėjo bei srovės kurso kampą ir kt.

Surinkti ir išanalizuoti papildomi tyrimams atlikti būtini duomenys, tokie kaip: navigacinių kanalų (vandens kelių) plotis, gylis, vilkikų turimos įrangos parametrai vykdant operacijas. Be to, atsižvelgta į koeficientus, kurie nustatyti atliekant teorinius ir eksperimentinius tyrimus ir kalibruojant simulatorius, jie vėliau naudoti tęsiant tyrimus.

Parengti laivo ir vilkiko manevrinių savybių uosto akvatorijoje skaičiavimo metodiniai nurodymai, leidžianti tiksliai įvertinti ir parinkti optimalius vilkikų skaičių ir traukos jėgą, siekiant vykdyti vilkimo operacijas sudėtingomis sąlygomis.

Metodinių nurodymų rengimo etapai:

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

- pirminių duomenų (laivą veikiančių jėgų, vėjo bei srovės krypčių ir stiprumo) rinkimas bei analizė;
- laivo ir vilkiko manevrinių savybių uosto akvatorijoje atliekant įvairias operacijas įvertinimas;
- optimalių vilkikų skaičiaus ir būtinos jų traukimo jėgos parinkimas;
- vilkimo operacijų laiko ir galimų sąnaudų numatymas;
- išvadų ir rekomendacijų dėl konkrečių sąlygų rengimas.

Siūlomi metodiniai nurodymai patikrinti remiantis atvejo analize. Detaliai išanalizuotas vilkikų darbas Klaipėdos uoste bei atlikti realiais duomenimis pagrįsti skaičiavimai. Remiantis tyrimų rezultatais sukurti metodiniai sprendiniai, kurie remiasi teorinių modelių palyginamąja analize, taikomi parenkant optimalius vilkikų skaičių ir traukos jėgą. Šie metodiniai nurodymai galėtų būti taikomi praktiškai bet kuriam uoste, nes siūlomą universalią vilkikų skaičiaus ir traukos skaičiavimo metodiką nesunku pritaikyti konkretaus uosto sąlygoms ir situacijoms: atliekant skaičiavimus naudojami bendri parametrai, pavyzdžiui, vėjo ir srovės, šiuos duomenis vertinant esamą situaciją daugeliu atvejų galima gauti tiesiogiai ir jais remiantis parengti geriausią sprendimą. Be to, taikant mūsų parengtus vilkikų skaičiaus ir traukos jėgos skaičiavimo metodinius nurodymus paprastai nereikia specialios įrangos (programinės, simuliacinės ar pan.), nes šią informaciją kaupia ir bet kada gali pateikti už saugią laivybą atsakingi uosto administracijos skyriai.

2.2. Vilkikų naudojimo, gerinant laivų manevrines galimybes, teorinis metodas, pagrįstas d'Almberio jėgų ir momentų principu

Laivui manevruojant uoste, jam vykdant švartavimosi ir atsišvartavimo operacijas, pagrindines jį veikiančias jėgas galima taip suskirstyti: laivo inercijos jėgos ir momentas, atsirandantis laivui stabdant arba didinant greitį; hidrodinaminės jėgos ir momentai; hidrodinaminės „sparno“ jėgos ir momentas (laivui judant prieš srovę arba stovint srovėje); aerodinaminės jėgos ir momentas; sekliojo vandens poveikio jėgos ir momentas, kt. Pasirinktas d'Almberio principas leidžia veikiančias jėgas ir momentus išskaidyti. Šiuo atveju tiriant vilkikų ir laivų sąveiką, vertinamos vidinės ir išorinės jėgos, kurias turi kompensuoti vilkikai.

Atsižvelgiant į uosto vilkikų vykdomas funkcijas, jie turi atitikti tam tikrus reikalavimus, pavyzdžiui:

- manevringumo;
- galingumo;
- mažos grimzlės;
- galimybės atlikti papildomas funkcijas.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Laiivui manevruojant, jį veikiančias išorines jėgas ir momentus būtina kompensuoti sukuriant jas atstojančias vidines ir išorines jėgas bei momentus, tam paprastai pasi-
telkiami vilkikai. Taigi jėgos ir momentai gali būti apskaičiuoti taikant šį matematinį
modelį (Olba, Daamen 2018; Paulauskas ir kt. 2021):

$$X_{in} + X_k + X_\beta + X_p + X_N + X_a + X_c + X_b + X_{sh} + X_T + X_{tug} + \dots = 0 \quad (2.1)$$

$$Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_p + Y_N + Y_a + Y_c + Y_b + Y_{sh} + Y_T + Y_{tug} + \dots = 0 \quad (2.2)$$

$$M_{in} + M_k + M_\beta + M_p + M_N + M_a + M_c + M_b + M_{sh} + M_T + M_{tug} + \dots = 0, \quad (2.3)$$

kur: X_{in}, Y_{in}, M_{in} – inercijos jėga ir momentas; jėgos ir momentai, sukurti laivo korpuso X_k, Y_k, M_k , gali būti apskaičiuoti remiantis J. Čerkos (Čerka 2005), A. F. Mollando ir S. R. Turnocko (Molland ir Turnock 2011) darbuose pateikta metodologija; $X_\beta, Y_\beta, M_\beta$ – laivo korpuso sukuriamas „sparno“ efektas gali būti apskaičiuotas, remiantis V. Paulausko ir D. Paulausko sukurta metodologija (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2009); X_p, Y_p, M_p – laivo vairavimo mechanizmų sukuriami jėgos ir momentai; X_N, Y_N, M_N – laivo pavairavimo įrenginių sukuriami jėgos ir momentai; X_a, Y_a, M_a – aerodinaminės jėgos ir momentai, kurie gali būti apskaičiuoti remiantis A. F. Mollando ir S. R. Turnocko (Molland ir Turnock 2011), K. J. Rawsono ir E. C. Tupperio (Rawson ir Tupperio 2001) pasiūlytomis metodikomis; X_c, Y_c, M_c – srovių sukuriamos jėgos ir momentai, gali būti apskaičiuoti remiantis V. Paulausko (Paulauskas 2013) ar X. B. Olba’os ir W. Daameno (Olba ir Daamen 2018) metodikomis; X_b, Y_b, M_b – bangų sukuriami jėgos ir momentai, kuriuos galima apskaičiuoti, remiantis D. Paulausko (Paulauskas 2019a) metodika; X_{sh}, Y_{sh}, M_{sh} – seklaus vandens efekto sukuriamos jėgos ir momentai; X_T, Y_T, M_T – laivo sraigto(ų) sukuriamos jėgos ir momentai, juos galima apskaičiuoti, remiantis V. Paulausko ir D. Paulausko (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2009) metodikomis; $X_{tug}, Y_{tug}, M_{tug}$ – naudojant vilkikus sukuriamos jėgos ir momentai. Papildomos jėgos ir momentai gali būti sukuriami veikiant švartavimo lynų ir kitiems veiksniams.

Žemiau pateikiama atlikta kompleksinė analizė, leidžianti nustatyti pagrindinius laivybos saugumo parametrus, kurie lemia praktinį sukurto matematinio modelio panaudojimą juos atmetant kaip darančius nedidelį poveikį arba jo iš viso nedarančius, arba sunkiai įvertinamus ar įtraukiant į modelį kaip esminius, siekiant išsikelti tikslo – sukurti matematinį modelį, kuris apimtų laivo prisišvartavimo / atsišvartavimo operacijas veikiančias jėgas ir momentus, kurie susidaro dėl hidrologinių ir meteorologinių sąlygų.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Inercijos jėgos ir momentai X_{in}, Y_{in}, M_{in} , kuriuos galima apskaičiuoti remiantis aprobuotais įvairių mokslininkų analitiniais sprendimais:

$$X_{in} = (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} \quad (2.4)$$

$$Y_{in} = (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} \quad (2.5)$$

$$M_{in} = I_z(1 + k_{66}) \frac{d\omega}{dt} + \rho V(k_{11} - k_{22})v^2\beta, \quad (2.6)$$

kur: m – laivo masė; λ_{11} – pridėtoji vandens masė X ašies kryptimi; v_x – laivo greitis X ašimi; λ_{22} – pridėtoji vandens masė Y ašimi; v_y – laivo greitis Y ašies atžvilgiu; I_z – inercijos momentas Z ašies kryptimi; k_{66} – inercijos momento koeficientas; ω – besisukančio laivo kampinis greitis; ρ – vandens tankis; V – laivo vandentalpa; k_{11} – pridėtosios vandens masės X ašies kryptimi koeficientas; k_{22} – pridėtosios vandens masės Y ašies kryptimi koeficientas; v – laivo greičio modulis; β – laivo dreifo kampas.

Jėgos ir momentai, sukuriama laivo vairavimo mechanizmų (vairo plokštės) X_p, Y_p, M_p , gali būti apskaičiuoti pagal formules (Molland ir Turnock 2011):

$$X_p = C_{vx} \frac{\rho}{2} S_p v_s^2 \quad (2.7)$$

$$Y_p = C_{vy} \frac{\rho}{2} S_p v_s^2 \quad (2.8)$$

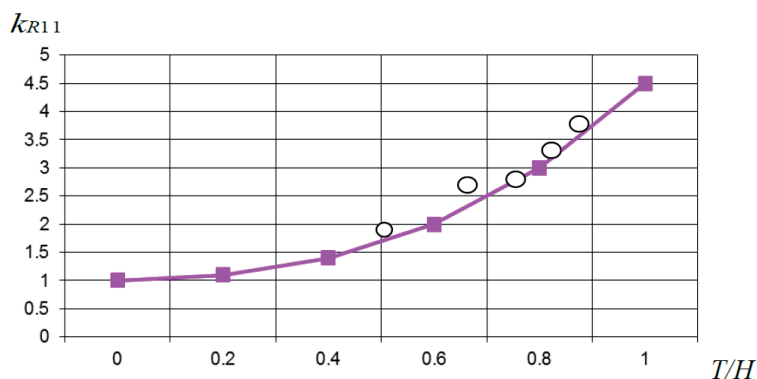
$$M_p = Y_p l_p, \quad (2.9)$$

kur: C_{vx}, C_{vy} – vairo hidrodinaminiai koeficientai; ρ – vandens tankis; S_p – vairo plokštės projekcijos į diametraliąją (vidurinę) plokštumą plotas; l_p – vairo skersinės jėgos petys.

Seklaus vandens efekto sukuriama jėgos ir momentai X_{sh}, Y_{sh}, M_{sh} gali būti apskaičiuoti tiek taikant teorinius metodus ir modelius, tiek atliekant tyrimus laivuose realiomis sąlygomis. Sekliuose vandenyse laivo manevravimo charakteristikos dėl padidėjusio seklos efekto yra skirtingos – padidėjusi laivo grimzlė ir pasipriešinimas, kartu padidėjusi laivo korpuso dugno trintis su vandeniu. Laivo judėjimo charak-

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

teristikų pokytį galima išreikšti pasipriešinimo koeficientu, kuris priklauso nuo laivo grimzlės ir gylio santykio (T/H). Laivui judant tiesiai, jo pasipriešinimo koeficiento pokytis dėl seklumos poveikio parodytas 2.2 paveiksle. Eksperimentuota su realiais laivais, siekiant palyginti laivo greitį esant tokiai pat galiai, kurią naudoja laivo variklis, plaukdamas dideliame gylyje ($H/T \geq 6$) ir sekluma ($T/H \leq 6$). Laivo greičio matavimai atlikti su ypač tikslia „E-Sea Fix“ navigacijos įranga. Taikytas nuokrypis neviršija 0,1 mazgo, arba 1 %, pradinio laivo greičio. 2.2 ir 2.3 paveiksluose pateiktos priklausomybės, veikiant seklaus vandens efektui, tai ypač svarbus parametras, nes gyliai daugelio uostų kanaluose yra santykinai maži, prie krantinių jie dar mažesni, tai rodo ir Klaipėdos bei aplinkinių uostų pavyzdžiai (Liebuvienė ir Čižiūnienė 2022). Esant mažam gyliui, tarpas tarp laivo korpuso ir kanalo dugno mažėja, kartu didėja laivo korpuso pasipriešinimas bei keičiasi laivo manevrinės savybės. Sudėję visus šiuos veiksnius gausime bendrą laivo valdomumo poveikį, kuris skiriasi esant dideliems gyliams, kai papildomai neveikia seklaus vandens efektas, verčiantis įvertinti papildomas laivo korpuso pasipriešinimo jėgas (Xu, Hinostroza ir kt. 2020). Tokiais atvejais aptarnaujant ribinio dydžio laivus ypač svarbu kuo tiksliau nustatyti reikiamą vilkikų traukos jėgą ir skaičių, siekiant užtikrinti saugumą uoste bei sėkmingai įvykdyti operaciją.



2.2 pav. Laivo pasipriešinimo judant tiesiai koeficientas k_{R11} , atsižvelgiant į laivo grimzlę ir gylio santykį T/H (● – skaičiavimo ir eksperimentiniai rezultatai) (Paulauskas ir kt. 2021).

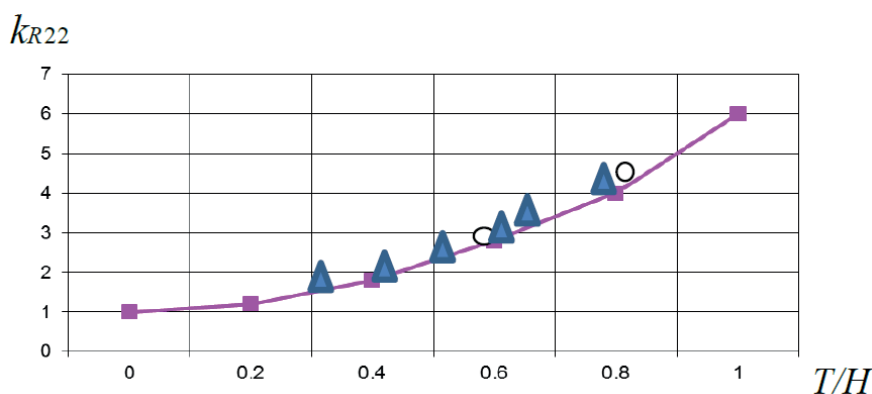
Fig. 2.2. Ship resistance coefficient k_{R11} while moving straight depends from draught and total deep ratio T/H

Laivo pasipriešinimo koeficientas laivui judant tiesiai k_{R11} , atsižvelgiant į T/H , gali būti apskaičiuotas pagal šią regresijos formulę (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2009):

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

$$k_{R11} = 1 + 3,45\left(\frac{T}{H}\right)^2; R^2 = 0,91. \quad (2.10)$$

Laivui judant šonu, pasipriešinimo koeficiento padidėjimas, atsižvelgiant į eksperimentuojant, kai naudotos AIS (AIS 2020) ir AIS-LERS (AIS-LERS 2020), nustatytą santykį T/H , parodytas 2.3 paveiksle. Eksperimentuojant matuotas laivo dreifo kampas dideliame gylyje ($T/H \geq 6$) ir seklumoje ($T/H \leq 6$). Laivo dreifo kampo matavimai atlikti su ypač tikslia „E-Sea Fix“ navigacijos įranga. Taikyta tolerancija neviršija 0,1 %, arba 1 % laivo dreifo kampo dideliame gylyje ir seklumoje.



2.3 pav. Papildomas laivo pasipriešinimo, judant šonu, koeficientas, atsižvelgiant į laivo grimzlės ir gylio santykį T/H (skaičiavimai ir eksperimentiniai rezultatai: ● – tanklaiviui $L = 250$ m ir ▲ – konteineriniam laivui $L = 365$ m) (Paulauskas ir kt. 2021)

Fig. 2.3. Additional ship resistance while there is side movement coefficient, depends on ship draught and total depth ratio T/H (calculation and experimental results for ● – crude oil vessel $L = 250$ m and ▲ – for container vessel $L = 365$ m results)

Laivo judėjimo šonu pasipriešinimo koeficientą k_{R22} , atsižvelgiant į T/H , galima apskaičiuoti pagal šią regresijos formulę (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2009):

$$k_{R22} = 1 + 4,95\left(\frac{T}{H}\right)^2; R^2 = 0,93. \quad (2.11)$$

Gauta laivo pasipriešinimo koeficiento formulė laivui judant šonu suteikia galimybę apskaičiuoti tikrąjį laivo pasipriešinimą švartuojantis prie krantinės ar atsišvartuo-

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

jant nuo jos. Tai ypač svarbu, kai laivai švartuojasi nedideliame gylyje prie krantinių, esančių dideliu kampu (50° – 90°) į srovės kryptį ir kitose situacijose. Papildomas laivo šoninis pasipriešinimas laivui judant svarbus manevruojant uostuose, kur nedideli gyliai, nes mažina laivo dreifo greitį, laivų kampinį sukimosi greitį, kt. Žinotinas skaičiuojant būtinas vilkikų tempimo jėgas.

Regresijos metodu gautų (2.10) ir (2.11) formulių taikymas atskleidė, kad ieškomų reikšmių paklaidos taikant regresijos formules, lyginant su šaltinių ir realiuose laivuose atliktų eksperimentų rezultatais, neviršija 5–7 % (Quy, Łazuga ir kt. 2020).

Laivo pavairavimo įrenginių X_N, Y_N, M_N sukuriama jėgas ir momentus galima taip apskaičiuoti:

$$X_N = k_{NX} F_{NX} \left(1 - \frac{v'}{v'_0}\right) \quad (2.12)$$

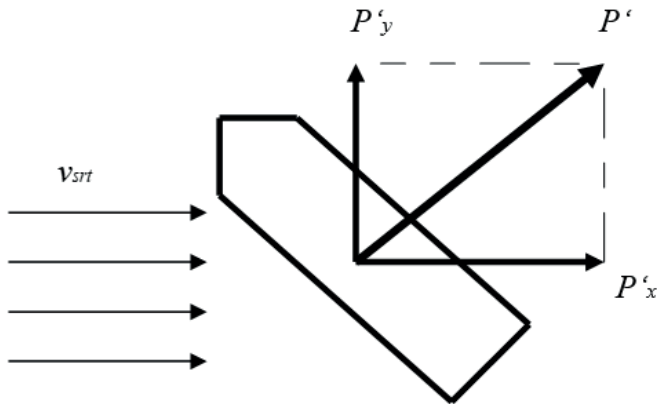
$$Y_N = k_{NY} F_{NY} \left(1 - \frac{v'}{v'_0}\right) \quad (2.13)$$

$$M_N = Y_N l_N, \quad (2.14)$$

kur: k_{NX} – pavairavimo įrenginio jėgos koeficientas X ašies kryptimi, kuris gali svyruoti nuo 0,01 iki 0,1, atsižvelgiant į tai, kaip pavairavimo įrenginys laive sumontuotas; F_{NX} – pavairavimo įrenginio sukuriama jėga X kryptimi, gali būti paimta iš įrenginio specifikacijos; v'_0 – laivo efektyvusis greitis, daugeliu atvejų siekia iki 3–4 m/s; v' – laivo greitis, kuris gali svyruoti nuo 0 iki v'_0 ; k_{NY} – pavairavimo įrenginio jėgos koeficientas Y kryptimi, kuris gali svyruoti nuo 0,8 iki 1,0, atsižvelgiant į laivo greičio ir įrenginio padėtį laive; F_{NY} – pavairavimo įrenginio sukuriama jėga Y ašies kryptimi, jos reikėtų ieškoti įrenginio gamintojo specifikacijoje; l_N – pavairavimo įrenginio skersinės jėgos pety.

Laivo korpusą galima analizuoti pavieniais atvejais kaip „sparną“, ypač dėl vėjo ir srovės poveikio. „Sparno“ efektas pasireiškia susidarius kampui tarp srauto ir laivo (2.4 pav.). Jį lemiantys momentai šiuo atveju yra $X_\beta, Y_\beta, M_\beta$

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.4 pav. Laivą veikiantis „sparno“ efektas:

P' – bendroji „sparno“ jėga; P'_x – „sparno“ pasipriešinimo jėga; P'_y – „sparno“ šoninė (keliamoji) jėga

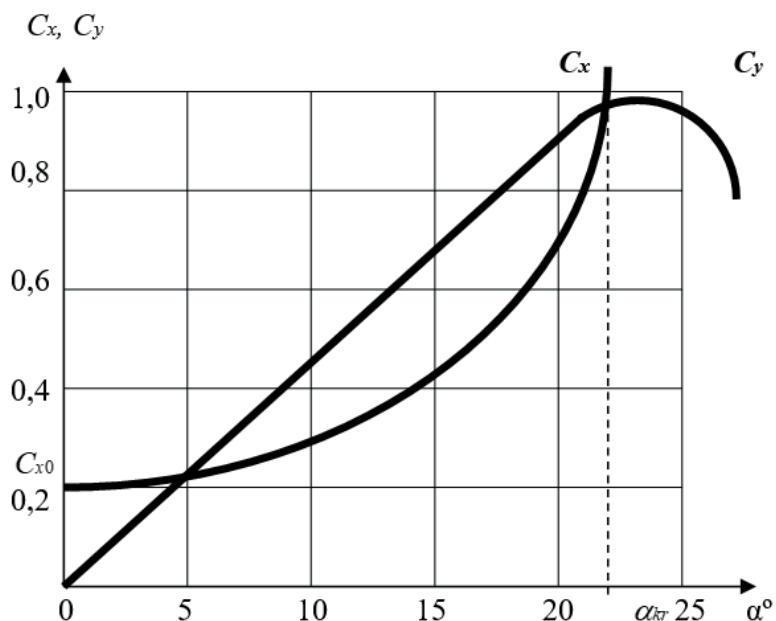
Fig. 2.4. Wing effect for ship:

P' – general wing force; P'_x – wing resistance force; P'_y – wing side (lifting) force

Laivo korpusas nereikėtų priimti kaip profiliuoto, gerai aptekancio „sparno“, bet esant nedideliems atakos kampams (iki 25° – 30°) daugelis plokščio laivui „sparno“ efekto savybių turi būti vertinamos jam manevruojant, kartu ir valdant laivus uosto sąlygomis (Paulauskas V. ir Paulauskas D. 2009; Bertram 2011).

Viena pagrindinių „sparno“ teorijos charakteristikų yra bedimensiniai „sparno“ hidrodinaminiai arba aerodinaminiai koeficientai C_x, C_y . Priimant laivo korpusą kaip neprofiluotą „sparną“, hidrodinaminiai koeficientai gali būti išreikšti taip, kaip nurodyta 2.5 paveiksle.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.5 pav. Laivo korpuso, kaip „sparno“, aerodinaminiai ir hidrodinaminiai koeficientai:

C_x – pasipriešinimo koeficientas; C_y – šoninės arba keliamosios jėgos koeficientas;
 α – atakos kampas; α_{kr} – kritinis atakos kampas; C_{x0} – pasipriešinimo koeficientas, kai atakos kampas lygus 0 (Paulauskas D. 2019b).

Fig. 2.5. Ship hull acting like wing aerodynamic and hydrodynamic coefficients:

C_x – resistance coefficient; C_y – side or lifting force coefficient; α – attach angle; α_{kr} – critical attack angle; C_{x0} – resistance coefficient when attack angle is equal 0

Kritinis atakos kampas α_{kr} atitinka sąlygą, kai už „sparno“ srautas tarsi nutrūksta (prasideda sūkuriniai vandens procesai). Profiliuoto „sparno“ atveju šis kampas yra apie 37° – 38° , neprofiluoto (plokščio), kuriam galima priskirti laivo korpuso povandeninę dalį (hidrodinaminis poveikis) arba laivo antvandenines dalis (aerodinaminis poveikis), kritinis atakos kampas bus apie 22° – 30° , o maksimalus šoninės jėgos koeficientas C_y lygus maždaug 1-tui.

Gana dažna situacija, kai laivas vilkikų traukiamas prieš srovę arba laikoms vienoje vietoje (esant srovei), tai atitinka srovės aptekėjimą. Atsiradusi hidrodinaminė jėga (šoninė) veikia laivą statmena srovės kryptimi.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Hidrodinaminė jėga P'_y , veikianti statmenai srovės tėkmės kryptčiai, gali būti apskaičiuota pagal formulę 2.15 (Bertram 2012):

$$P'_y = C_y \frac{\rho}{Z} F_d (v_{sr} + v)^2, \quad (2.15)$$

kur: F_d – laivo povandeninės dalies projekcijos į vidurinę (diametraliąją) plokštumą plotas, apskaičiuojamas pagal 2.16 formulę:

$$F_d = fLT, \quad (2.16)$$

kur: f – laivo vidurinės plokštumos pilnumo koeficientas – nuo 0,95 (vienasraigčiai laivai be bulbo) iki 1,0 (laivai su bulbu); L – laivo ilgis tarp statmenų; T – vidutinė laivo grimzlė.

v_{sr} – srovės greitis; v – laivo greitis: jeigu laivas juda prieš srovę, v ženklas yra teigiamas, jeigu plaukia pasroviui, ženklas neigiamas.

Aerodinaminių jėgų sukeltos jėgos ir momentai skirstomi į X_a, Y_a, M_a . Vėjo poveikis, arba aerodinaminis momentas, apskaičiuojamas pagal 2.17 formulę (Bertram 2012):

$$M_a = C_{yv} \frac{\rho_1}{2} S_x (v_a \cdot \sin q_a + v)^2 x_v, \quad (2.17)$$

kur: C_{yv} – aerodinaminis koeficientas, gali būti priimtas nuo 0,9 iki 1,3, atsižvelgiant į viršvandeninę laivo architektūrą; S_x – laivo viršvandeninės dalies projekcijos į vidurinę plokštumą plotas; v_a – tikrasis vėjo greitis; $\sin q_a$ – vėjo kurso kampas pradiniam laivo manevro taške; x_v – aerodinaminės jėgos abscisė.

Bangos poveikio jėgas ir momentus galima suskirstyti į X_b, Y_b, M_b . Bangos poveikis priklauso nuo bangavimo krypties, o jo dydis gali būti apskaičiuotas pagal 2.18 formulę (Bertram 2012):

$$M_b = C_B \frac{\rho}{2} \cdot L \cdot hB \cdot (k_B v_a)^2 \sin q_B, \quad (2.18)$$

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

kur: C_B – bangos poveikio koeficientas, kuris gali būti priimtas kaip hidrodinaminės plokštės, išdėstytos skersai srauto, koeficientas. Kadangi laivo priekinė ir galinė dalys yra aptakios bangos poveikiui, šis koeficientas gali būti priimtas apie 1,2–1,5. 1,2 – laivams, kurių santykinai mažas bendras laivo korpuso pilnumo koeficientas, t. y. mažesnis negu 0,7; 1,5 – laivams, kurių bendras laivo korpuso pilnumo koeficientas yra 0,7–0,9. Laivų, kurių bendras pilnumo koeficientas yra virš 0,9 (tai atitinka upių ir kitas panašias baržas), C_B yra apie 1,7–1,9;

h_B – bangos aukštis, kurio sandauga su laivo ilgiu tarp laivo statmenų L išreiškia realią bangų veikiamą laivo plokštumą; k_B – bangos energijos pernešimo (palyginus su vėjo greičiu) koeficientas, vidutiniškai gali būti priimtas apie 0,6; q_B – bangos kurso kampas.

Jėgos ir momentai, sukurti laivo korpuso X_k, Y_k, M_k , skaičiuojami įprastais laivo teorijos metodais. Praktiškai skaičiuojant gali būti taikomas mišrus metodas, kai dalis pasipriešinimo komponentų apskaičiuojama įprastomis laivo teorijos formulėmis, dalis – empirinėmis. Taigi laivo (vilkiko) pasipriešinimas (X_k) bus lygus (Fossen 2011):

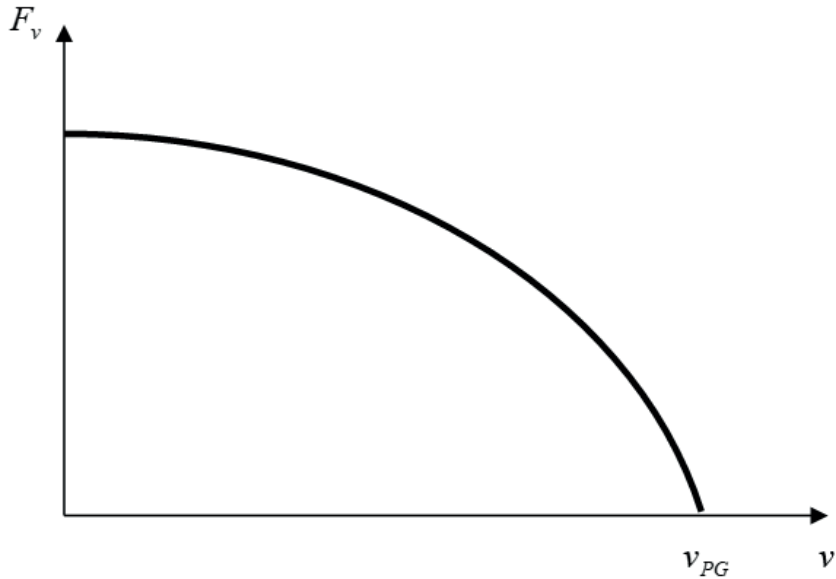
$$(X_k) = R_v = R_{tr} + R_f, \quad (2.19)$$

kur: R_v – trinties pasipriešinimas; R_{tr} – trinties koeficientas, jį galima gauti skaičiuojant įprastais laivo teorijos metodais arba jis gali būti priimtas vidutinis – 0,0015–0,002; R_f – laivo formos pasipriešinimas, kartais vadinamas *liekamuoju pasipriešinimu*.

Laivui manevruojant, vilkikai jam suteikia papildomą sukimo momentą. Pasitelkus vilkikus, laivui manevruojant būtina įvertinti laivo ir vilkiko (vilkikų) sąsają bei vilkiko veikiamos jėgos pokytį, judant pačiam laivui. Laivui judant vilkiko traukos jėga sumuojasi su laivo judesio jėga, kai laivo greitis didelis, vilkiko naudingoji traukos jėga iš dalies tenka pačiam vilkikui.

Vilkiko traukos jėga, atsižvelgiant į jo greitį, sudaro logaritminę priklausomybę (2.6 pav.).

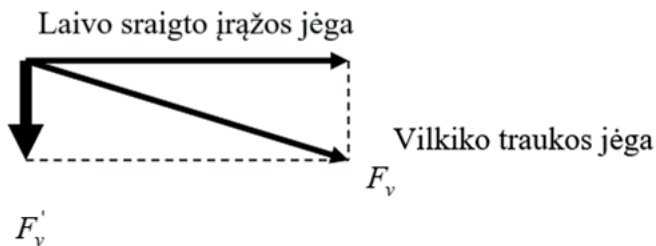
2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.6 pav. Vilkiko naudingoji traukos jėga, priklausanti nuo jo greičio

Fig. 2.6. Tug efficiency bollard pull depends on speed

Taigi esant santykinai dideliame laivo greičiui, vilkiko traukos jėga yra maža. Be to, vilkiko traukos jėga, kai jis naudojamas keisti laivo trajektoriją, nukreipta kampų į laivo judesį. Taigi reali naudingoji jėga bus lygi jėgų skirtumui (2.7 pav.).



2.7 pav. Vilkiko traukos jėgos kryptis laivui judant:

F_v – vilkiko traukos jėga („jėga ant kablo“); F_v' – laivo sukimą veikianti vilkiko jėga.

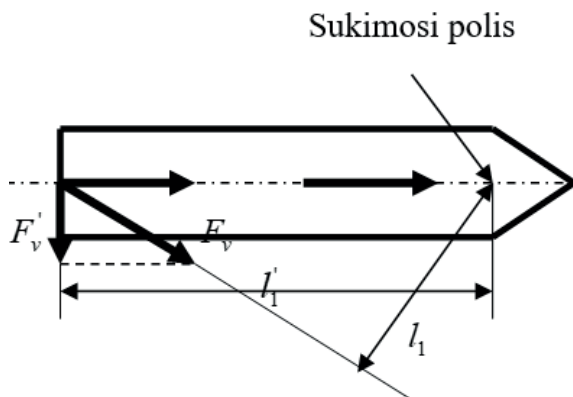
Fig. 2.7. Bollard pull of tug during movement:

F_v – tug bollard pull; F_v' – tug acting force during movement.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Veikiant laivo judesio trajektoriją ypač svarbu sudaryti laivo sukimo momentą, tuo tarpu vilkiko jėgos krypties keitimas mažina sukimo momentą.

Laivui plaukiant į priekį, jo sukimosi polis (ašis) yra priekinėje laivo dalyje ir priklauso nuo laivo sukimosi parametrų. Taigi naudingą vilkiko traukos jėgą tikslinga pridėti taip, kad susidarytų didžiausias galimas petys, kartu ir sukimo momentas (2.8 pav.) (Serhii ir kt. 2023).



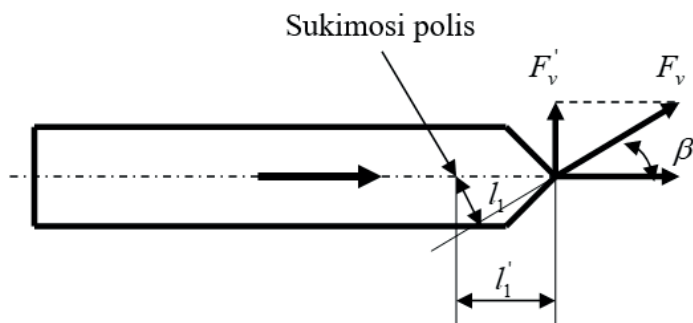
2.8 pav. Vilkiko jėga ir jėgos petys laivui judant į priekį, kai jam pasisukti padeda vilkikas laivagalyje:

l_1 – petys; F_v – jėga; l'_1 – petys; F'_v – jėga.

Fig 2.8. Tug generating force and force shoulder while vessel moving forward direction, while turning vessel and tug acting from vessel stern:

l_1 – shoulder; F_v – force ; l'_1 – shoulder; F'_v – force.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.9 pav. Vilkiko jėga ir petys laivui judant į priekį, kai jam pasisukti padeda vilkikas laivapriekyje:

l_1 – petys; F_v – jėga; l'_1 – petys; F'_v – jėga.

Fig. 2.9. Tug generating force and force shoulder while vessel moving forward direction, while turning vessel and tug acting from vessel bow:

l_1 – shoulder; F_v – force; l'_1 – shoulder; F'_v – force.

Kaip matyti iš pateiktų pavyzdžių, laivui judant tuo pačiu greičiu ir naudojant tą pačią vilkiko traukimo jėgą, laivo sukimo momentas, vilkikams esant laivapriekyje, kelis kartus mažesnis nei vilkikams esant laivagalyje. Laivapriekyje esantis vilkikas praktiškai turi patraukti visą laivą skersai srauto, laivo trajektorijos pokyčio aspektu tai mažai veiksminga.

Vilkikais reguliuojant laivo trajektoriją svarbus kampas tarp vilkimo lyno ir laivo judėjimo krypties, t. y. kampas β . Laivo sukimo momentą galima taip užrašyti:

$$M'_v = F_v \cdot \sin \beta \cdot l'_1 \quad (2.20)$$

Vilkiko naudingoji traukos jėga, kai vilkimo lynas laive tvirtinamas aukščiau nei vilkike, gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$F'_v = F_v \cdot \cos \alpha \quad (2.21)$$

Laivo valdymą (pasukimą) veikiantis vilkiko sukuriamas momentas, įvertinant vilkimo lyno vertikalų kampą α ir horizontalų kampą β , gali būti išreikštas formule:

$$M_v = F_v \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot l'_1 \quad (2.22)$$

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Naudojant vilkiką, laivo trajektorijai reguliuoti laivo sukimo momentas gali būti taip užrašytas:

$$M'_v = F_v \cdot \sin \beta \cdot l'_1. \quad (2.23)$$

Prišvartuojant laivą prie krantinės ir atšvartuojant nuo jos būtina tiksliai apskaičiuoti būtiną papildomą jėgą ir būtiną vilkikų traukos jėgą, kuri kompensuos išorines poveikio jėgas. Bendruoju atveju švartuojamo laivo matematiniai modeliai sudaromi nustatant šias jėgas:

- laivo inercijos (stabdant laivą arba jam suteikiant būtiną greitį);
- hidrodinaminės srovės tiesioginio poveikio;
- hidrodinaminės „sparno“ poveikio (laivui judant prieš srovę arba stovint grunto atžvilgiu, esant srovei);
- aerodinaminės;
- seklumos poveikio.

Taigi švartuojamą laivą veikia dinaminės jėgos, dalį kurių įveikia laivo sraigto ir laivo vairo kompleksas bei papildomi vairavimo įrenginiai, jeigu jų yra, kitą dalį – vilkikai. Norint nustatyti būtiną vilkikų skaičių ir jų traukos jėgą būtina įvertinti galimus jėgos poveikius.

Kai laivas plaukia nedideliu greičiu ar stovi vietoje, vilkikai naudojami panašiai: laivui apsukti arba švartavimo operacijoms – priplukdyti laivą prie krantinės arba nuplukdyti nuo jos, t. y. suteikti laivui norimą judėjimo trajektoriją.

Šiuo atveju vilkikų pasitelkimas laivui manevruojant uoste, siekiant reguliuoti jo judėjimo trajektoriją, yra svarbus, tik siekiant norimo rezultato būtina tiksliai įvertinti laivo ypatumus: būtiną laivo sukimosi polio (ašies) padėtį ir minimalią vilkikų traukos jėgą.

Laivo inercinę jėgą visada būtina įvertinti laivą stabdant arba jam įsibėgėjant. Bendruoju atveju laivo inercinės jėgos apskaičiuojamos pagal formulę (Fossen 2011):

$$m \frac{dv}{dt} = R + F + T_{pv} + \sum T_v, \quad (2.24)$$

kur: m – laivo masė, kartu su pridėtąja skysčio mase; $\frac{dv}{dt}$ – laivo pagreitis, kur v – laivo greitis; R – laivo korpuso pasipriešinimas; F – laivo sraigto įrašos jėga; T_{pv} – laivo pavairavimo įrenginių sukuriama jėga; $\sum T_v$ – suminė vilkikų sukuriama jėga.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Srovės jėgos ir momentai išreiškiami X_C, Y_C, M_C . Tiesioginės srovės poveikis pasireiškia kaip hidrodinaminis pasipriešinimas, apskaičiuojamas pagal formulę (Fossen 2011):

$$R = C \frac{\rho}{2} \cdot \Omega \cdot v^s \sin q_{sr}, \quad (2.25)$$

kur: C – hidrodinaminis koeficientas; ρ – vandens tankis; Ω – sudrėkintasis laivo korpuso plotas; v – judėjimo greitis grunto atžvilgiu; q_{sr} – srovės poveikio kampas (srovės kurso).

Srovės greitis, kartu ir jos poveikis ypač svarbūs, kai laivas laikomas vienoje vietoje grunto atžvilgiu arba juda prieš srovę. Seklomos poveikio jėga pasireiškia kaip padidėjusi pridėtoji skysčio masė ir gali būti skaičiuojama atskirai arba vertinant laivo masę kartu su pridėtąja skysčio mase.

Seklomos arba srovės poveikis kartais, esant mažam gyliui, įvertinamas pagal 2.26 formulę (Fossen 2011):

$$K_s = k_s \cdot f \cdot L \cdot T \cdot v_s, \quad (2.26)$$

kur: K_s – srovės sukuriama jėga; T – laivo grimzlė; k_s – koeficientas, atitinkantis didelį gylį, priimamas apie 0,033; f – mažo gylio poveikio koeficientas, jį galima nustatyti remiantis monograma; v_s – srovės greitis, m/s.

Taigi pateikta metodika leidžia apskaičiuoti jėgas, kurios veikia laivą jam manevruojant uoste ir jį švartuojant. Pagal pagrindinę laivo judesio, kartu ir vilkikų poveikio lygtį apskaičiuojamos laivų švartavimosi sąlygos, būtinas papildomas vilkikų galinumas, pagal kurį (traukimo jėgą) ir turimus uoste vilkikus skaičiuojamas būtinas minimalus vilkikų skaičius. Skaičiavimai atlikti krantinėms, prie kurių švartuojami 100 m ir ilgesni laivai, nes atsižvelgus į uosto turimus vilkikus bet kuris jų derinys leidžia pasiekti didesnę nei būtina vilkikų traukimo jėgą. Esant vienu metu srovei ir vėjui pirmiausia būtina įvertinti, kuris iš hidrometeorologinių elementų daro didesnę poveikį. Tai atliekama skaičiuojant bendrąją išorinių jėgų dedamąją laivo judėjimo prie krantinės kryptimi.

Laivo, kaip ir bet kurios kitos transporto priemonės, valdymas susijęs su maksimaliu gamtos sąlygų išnaudojimu, joms „neprieštaraujant“. Laivo valdymas išnaudojant

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

hidrometeorologines sąlygas – tai srovės ir vėjo sukuriamų jėgų arba jų derinio panaudojimas jam atliekant manevrą. Bangavimo poveikis gali būti išnaudotas (jeigu toks yra) kartu su kitomis hidrometeorologinėmis sąlygomis, bet daugeliu atvejų, kai yra nuolatinis arba atsitiktinis, lemia atvirkštinį efektą, kurį taip pat būtina įvertinti.

Manevruojant uoste vėjo ir srovės poveikis gali sudaryti būtinas jėgas ir momentus, dėl ko gali mažėti svarbus papildomas galingumas (vilkikų) arba jo gali būti atsisakyta. Taigi išnaudojant hidrometeorologines sąlygas galima mažinti vilkikų galingumą didinant navigacinį laivybos saugumą, ypač esant ribotoms sąlygoms.

Vilkikai ir laivo vairo(-ų) bei pavairavimo mechanizmai kuria jėgas ir momentus, kurie turi kompensuoti laivą veikiančias išorines jėgas. Lygčių sistemą galima taip išreikšti (Paulauskas V. ir kt. 2021):

$$X_{in} + X_k + X_\beta + X_a + X_c + X_b + X_{sh} + X_T + \dots = X_p + X_N + X_{tug} \quad (2.27)$$

$$Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_a + Y_c + Y_b + Y_{sh} + Y_t + \dots = Y_p + Y_n + Y_{tug} \quad (2.28)$$

$$M_{in} + M_k + M_\beta + M_a + M_c + M_b + M_{sh} + M_T + \dots = M_p + M_n + M_{tug} \quad (2.29)$$

Vilkiko(-ų) sukuriamos jėgos ir momentai $X_{tug}, Y_{tug}, M_{tug}$, atsižvelgiant į vilkimo sistemą (vilkimo arba traukimo / stūmimo), gali būti apskaičiuojami pagal laive fiksuotus vilkimo lynų tvirtinimo taškus.

Vilkimo jėgos petį galima apskaičiuoti naudojant laivo posūkio polio taško abscisę x_0 ir vilkimo lyno ilgį l_{tr} . Laivo sukimosi polio taškas priklauso nuo laivo judėjimo krypties, taigi laivui judant į priekį gali būti taip apskaičiuotas (Serhii ir kt. 2023):

$$x_0 = L \left(0,4 + 11,5 \frac{T_{lg} - T_{lp}}{L} - 0,004 \cdot \alpha_r^\circ \right) \quad (2.30)$$

kur: L – laivo ilgis tarp statmenų; T_{lp} – laivapriekio grimzlė; T_{lg} – laivagalio grimzlė; α_r° – vairo plokštės posūkio kampas (laipsniais).

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Galiausiai vilkimo jėgos petys gali būti apskaičiuotas pagal šią formulę:

$$l_{tug} = \left(x_0 + \frac{L}{2} \right) + l_{tr} \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha . \quad (2.31)$$

Uosto sąlygomis, nesant bangavimo arba kai jis labai mažas ir didelio poveikio vilkimo operacijai nedaro, vilkikų sukuriama jėgas ir momentus, kad laivas judėtų užduota trajektorija, galima taip apskaičiuoti:

$$X_{tug} = X_{in} + X_k + X_\beta + X_a + X_c + X_{sh} + X_T - X_p - X_N; \quad (2.32)$$

$$Y_{tug} = Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_a + Y_c + Y_{sh} + Y_T - Y_p - Y_N; \quad (2.33)$$

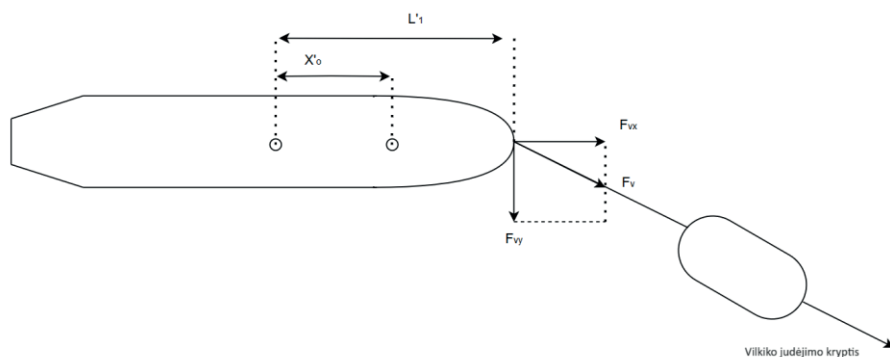
$$M_{tug} = M_{in} + M_k + M_\beta + M_a + M_c + M_{sh} + M_T - M_p - M_N \quad (2.34)$$

Matematinio modelio struktūrinis pagrindimas. Remiantis atlikta matematinio modelio struktūrine analize, įgyvendinant disertacijoje suformuluotus tikslus bei uždavinius, vilkikų traukos jėgai ir jų skaičiui nustatyti naudojama šoninė (Y kryptimi) formulė. Jėgų X kryptimi formule ir momentų lygtimi, taikant vektorinį metodą, skaičiuojami vilkimo lynų įtempimai ir trajektorijos. Šiuo atveju tokia jėgų ir momentų išraiška leidžia įvertinti tiesioginį poveikį įvairias operacijas vykdančiam vilkikui. Vilkimo operacijos metu veikiančios jėgos ir momentai yra pagrindinės dėdamosios, kurias svarbu tinkamai įvertinti siekiant užtikrinti navigacinę saugumą vykdant vilkimo operaciją analizuojant tokią sudėtingą dinaminę sistemą.

Atlikus išplėstinę palyginamąją analizę, išskirti šie pagrindiniai navigacinę saugumą lemiantys veiksniai: vėjo jėga ir kryptis, srovės jėga ir kryptis, seklaus vandens efektas, lyno įtempimas. Nepakankamas jų įvertinimas vykdant vilkimo operaciją lemia daugelį uostų incidentų.

Pagal (2.32)–(2.34) formules galima apskaičiuoti būtinas vilkikų traukos jėgas ir sukuriama laivo sukimo momentą, atsižvelgiant į vilkikų naudojamą arba galimą naudoti schemą (schemas).

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.10 pav. Laivo ir vilkiko schema su veikiančiomis jėgomis, vilkikui manevruojant iš laivapriekio

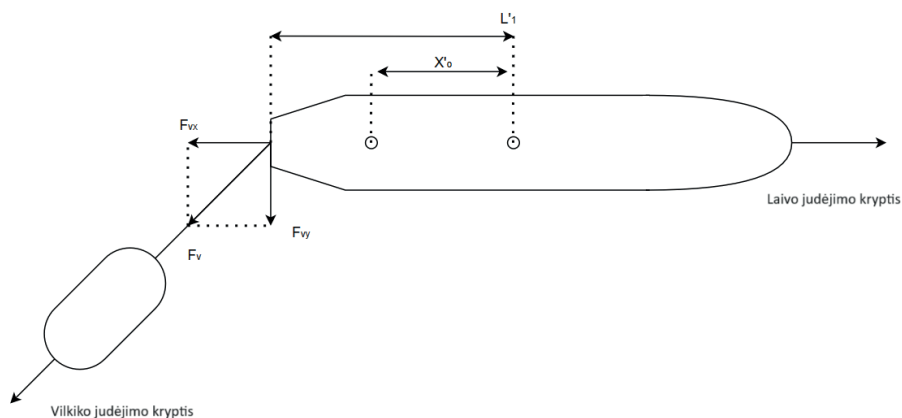
Fig 2.10. Vessel and tug scheme with acting forces during maneuver while tug working from vessel bow

Taigi galima teigti, kad vilkiko sukuriamus momentus ypač veikia šie parametrai: lyno ilgis, kampas tarp vilkiko ir laivo, variklių sukuriama galia ir judėjimo kryptis. Šios jėgos ir momentai nuolat kinta, tai priklauso nuo laivų padėties ir esamų sąlygų. Veikiančias jėgas ir sukuriamus momentus galima pavaizduoti taip, kaip parodyta 2.12 ir 2.13 paveiksluose. Vilkikai šiuo atveju veikia dviem režimais: vilkikas padeda laivui manevruoti uosto akvatorijoje prisikabinęs lyną iš priekio (2.12 pav.); vilkikas stabdo ir padeda manevruoti uosto akvatorijoje judantį laivą, vilkimo lyną tvirtinant laivagalyje (2.11 pav.). Vykdamt operaciją susidariusios jėgos sukuria momentus, atsižvelgiant į laivo sukimosi polio (ašies) padėtį.

Gauti duomenys leidžia įvertinti metodikos veiksmingumą ir praktinį pritaikymą, nustatant būtiną uosto vilkikų skaičių ir jų vilkimo jėgą. Tyrimams taikyta trijų pakopų sistema: matematinis skaičiavimo metodas; simuliacijos „SimFlex Navigator“; bandymai, atlikti realiuose laivuose panašiomis sąlygomis. Siekiant įvertinti atliktus skaičiavimus ir eksperimentų rezultatų tikslumą bei patikimumą, taikytas maksimalaus paskirstymo metodas.

Remiantis pateiktais metodiniais nurodymais, galima atlikti teorinius laivo įplaukimo ir išplaukimo, manevravimo, prisišvartavimo ir atsišvartavimo uoste sudėtingomis sąlygomis galimybių vertinimą bei minimalios vilkikų traukimo jėgos (angl. *bollard pull*) poreikio skaičiavimą. Teoriniai skaičiavimai tikrinti naudojant simulatorių „SimFlex Navigator“ (Strem 2004).

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.11 pav. Laivo ir vilkiko schema su veikiančiomis jėgomis, vilkikui stabdant laivą

Fig. 2.11. Vessel and tug scheme with acting forces during maneuver while tug working from vessel stern

Vertinant laivo valdomumą pasitelkus vilkikus atsižvelgiama į pagrindinius parametrus, tokius kaip vilkikų naudingoji galia, įvairūs sukuriami momentai ir jėgos, realiai atsirandantys vykdant įvairias vilkimo operacijas bei laivams manevruojant uoste. Galimybė matematinius skaičiavimus pritaikyti vertinant laivo valdomumą, kai pasitelkiami vilkikai, leidžia įvertinti veikiančias jėgas ir momentus konkrečiose situacijose, pavyzdžiui, kai vilkikai padeda laivams atsišvartuoti ar prisišvartuoti, jiems atliekant posūkio manevrus ar stabdant. Šie skaičiavimai toliau integruojami į matematinį modelį, kurio tikslas – apskaičiuoti reikiamą vilkikų traukos jėgą ir skaičių, siekiant užtikrinti navigacinę laivybos saugumą uoste vykdant įvairias operacijas. Teoriniai skaičiavimai ir vertinimo principai leidžia gerinti laivų valdomumą bei laivų įgulų narių pasirengimą esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms valdyti laivus taip, kad jie būtų saugūs, o manevrai – veiksmingi.

Pagrindinis parametras, apibūdinantis uosto vilkiko efektyvumą – vilkiko galingumas (vilkiko traukos jėga). Tam tikrais atvejais būtinas vilkikų galingumas gali būti apskaičiuotas pagal 2.35 formulę (Paulauskas V. 2013):

$$N_v = K_1 K_2 D , \quad (2.35)$$

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

kur: N_v – pagrindinio vilkiko variklio veiksmingas galingumas, kWt; D – aptarnaujamo laivo vandentalpa, tonomis; $K_1 K_2$ – empiriniai koeficientai: K_1 – aptarnaujamo laivo būklė (dirba pagrindinis variklis ar ne, laivas turi papildomų vairavimo įrenginių ar ne), koeficientas gali būti parinktas remiantis V. Paulausko pateikta monograma (Paulauskas 2013); K_2 – nuo hidrometeorologinių sąlygų priklausantis koeficientas, jį galima nustatyti iš monogramos (Vivekanandan 2012).

Vilkikų charakteristika – tai traukos jėga ant vilkiko kablo, t. y. naudingoji vilkiko vilkimo jėga, skaičiuojama kaip maksimali vilkiko sraigčių įrašos jėga, atėmus vilkiko pasipriešinimą (Prabowo ir kt. 2022):

$$F_v = P_e - R_v, \quad (2.36)$$

kur: P_e – maksimali vilkiko sraigčių įrašos jėga; R_v – vilkiko pasipriešinimas.

Maksimali vilkiko sraigčių įrašos jėga skaičiuojama pagal formulę:

$$P_e = n_s \cdot K_1' \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_s^4 (1 - t''), \quad (2.37)$$

kur: n_s – sraigčių skaičius; t'' – sraigto koeficientas; vilkikams gali būti priimtas 0,2; K_1' – sraigto įrašos koeficientas, vilkikams galima priimti apie 0,22.

Vilkiko pasipriešinimas (R_v) apskaičiuojamas įprastais laivo teorijos metodais. Skaičiuojant galima taikyti mišrų skaičiuojamąjį empirinį metodą, t. y. dalis pasipriešinimo komponentų apskaičiuojama įprastomis laivo teorijos formulėmis, dalis – empirinėmis. Taigi vilkiko pasipriešinimas bus lygus (Paulauskas V. 2013):

$$R_v = R_{tr} + R_f, \quad (2.38)$$

kur: R_{tr} – trinties koeficientas, apskaičiuojamas taip:

$$R_{tr} = C_{tr} \frac{\rho}{2} \Omega \cdot v^2, \quad (2.39)$$

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

kur: C_{tr} – trinties koeficientas, gali būti nustatytas įprastais laivo teorijos metodais arba priimtas 0,015 ÷ 0,020: mažesnė reikšmė taikytina naujiems arba doke remontuotiems vilkikams, didesnė – vilkikams, kurie doke nebuvo ilgesnį laiką arba senesniems vilkikams; – sudrėkintasis vilkiko korpuso plotas, kurį galima apskaičiuoti pagal Muragino formulę (Timoshenko 2013):

$$\Omega = L \cdot T \left(1,36 + 1,13 \cdot \delta \cdot \frac{B}{T} \right), \quad (2.40)$$

kur: δ – laivo korpuso bendrasis pilnumo koeficientas.

Vilkiko formos pasipriešinimas, kartais vadinamas *liekamuoju pasipriešinimu* R_f , tiksliai apskaičiuojamas, remiantis modelio bandymų baseine rezultatais. Jei tai neįmanoma, galima taikyti empirinę formulę, kuri užrašoma taip (Prabowo ir kt. 2022):

$$R_f = 90 \frac{\delta \cdot D \left(\frac{v}{10} \right)^4}{\left(\frac{L}{100} \right)^2}, \quad (2.41)$$

kur: D – laivo vandentalpa.

Atsižvelgiant į vilkiko tipą, jo korpuso geometriją, galią ir kitus parametrus, kuo tikslesnis universalus matematinis modelis, apimantis laivo parametrų skaičiavimą bei išorės jėgų dedamosios poveikį, tuo aiškesnis atsakymas dėl būtinos traukimo jėgos. Tai konvertuojant į vilkikų skaičių galima planuoti vilkimo operaciją esant įvairioms aplinkos sąlygoms. Galimybė tiksliai apskaičiuoti įvairius laivo manevringumo, statinius ir dinامينius parametrus, juos susiejant į vientisą matematinį modelį, leidžia tiksliai planuoti vilkimo operacijas, įvertinant visas galimas rizikas ir taip siekiant užtikrinti vilkimo operacijos sėkmingą vykdymą bei navigacinį saugumą uoste. Pažymėtina, kad ankstesni skaičiavimai to neužtikrindavo. Pateiktos formulės papildo ir praplečia esamus vertinimus bei skaičiavimus, kai vykdant vilkimo operaciją laivą ir vilkiką veikiančios išorinės jėgos įtraukiamos į matematinį modelį, taip tiksliau nustatant vilkimo operacijai būtiną vilkikų skaičių ir užtikrinant navigacinį laivybos saugumą uoste, nes įvertinamos papildomos sąlygos, kaip vėjo kryptis ir greitis, bei srovės poveikis, gali reikšmingai paveikti vilkimo operaciją. Neįvertinus šių sąlygų, galimi įvairaus pobūdžio incidentai ir nelaimės uoste bei jo priegose.

2.3. Vilkikų traukos jėgos matematinio modelio ir metodinių nurodymų sudarymas

Kadangi didžiausia vilkikų traukos jėga būtina vykdant šoninį laivo judesį, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą, tikslinga apskaičiuoti bendrą vilkikų traukos jėgą Y kryptimi. Tam būtina atsižvelgti į laivo korpuso pasipriešinimą laivui judant šonu (daugelyje operacijų tai nežymu dėl mažo laivo judėjimo greičio), aerodinaminės (vėjo) ir srovės sukuriamų bei inercijos jėgų ir sekulmos poveikio efekto. Tokiu atveju būtina vilkikų traukos jėga gali būti priimta kaip:

$$Y_{tug}^* = Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_a + Y_c + Y_{sh} . \quad (2.42)$$

* Apima vilkikų ir stūmos traukos jėgą (jei tokios yra) arba stūmos ir azipodų.

Įvertinus sudėtingas hidrometeorologines ir meteorologines sąlygas ir trumpalaikę būtiną vilkikų traukos jėgą bei ypač mažą laivo judėjimo greitį apskaitant laivą bei jį priešvartuojant arba atšvartuojant, inercijos jėgą galima priimti apie 1,5 nuo srovės poveikio jėgos, lygtis taip išreiškiama:

$$Y_{tug} = 1,5C \frac{\rho}{2} F_d v_y^2 (1 + 4,95(\frac{T}{H})^2) + C_a \frac{\rho_1}{2} S_x v_a^2 \sin q_a + C \frac{\rho}{2} F_d v_c^2 \sin q_c , \quad (2.43)$$

kur: C – laivo korpuso hidrodinaminis koeficientas; ρ – vandens tankis; F_d – laivo povandeninės dalies projekcijos į diametraliąją plokštumą plotas; V_y – laivo korpuso skersinis judėjimo greitis; T – laivo grimzlė; H – gylis; C_a – aerodinaminis koeficientas; ρ_1 – oro tankis; S_x – laivo viršvandeninės dalies projekcijos į diametraliąją plokštumą plotas; V_a – vėjo greitis; q_a – vėjo kurso kampas; V_c – srovės greitis; q_c – srovės kurso kampas.

Laivo korpuso hidrodinaminis koeficientas C jūrų laivams gali būti priimtas apie 1,5 (kaip plokštė su užapvalintais kraštais, išdėstyta skersai srauto), F_d galima taip apskaičiuoti:

$$F_d = LT . \quad (2.44)$$

Sudarytas matematinis modelis (žr. 2.43) apima pagrindines veikiančias jėgas laivams švartuojantis bei atšvartuojant, kurios lemia manevravimo saugumą, įtrauktos ir tokios dedamosios kaip seklaus vandens efektas, srovės bei vėjo krypties poveikis, kas nevertinta ankstesniuose modeliuose. Sudarant modelį į jį neįtrauktas bangų

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

poveikis, sparno efektas, nes vykdant atšvartavimo / priešvartavimo operacijas uosto sąlygomis šių jėgų poveikis santykinai mažas, be to, nėra priemonių, kurios galėtų tiksliai išmatuoti šių jėgų poveikį.

Taikyti sukurtą modelį galima ir nustatant dinaminį procesą, ir jį vertinant, kintant išorinėms poveikio jėgoms. Tuo tikslu nustatomas faktinio kitimo žingsnis, atsižvelgiant į laivo dispozicijos pokytį. Taip nustatoma maksimali būtina vilkikų traukos jėga (žr. pav. 4.32)

Remiantis sukurtu matematinio modeliu parengti metodiniai nurodymai kaip turint bendrą vilkimo operacijai būtiną traukos jėgą galima nustatyti optimalų vilkikų skaičių ir vilkimo schemą.

2.4. Praktinio pritaikymo metodiniai sprendiniai

Vilkikų optimalaus skaičiaus parinkimo, taikant maksimalią traukos jėgą, metodiniai pagrindai:

1. Bendros vilkikų traukos jėgos skaičiavimas taikant matematinį modelį (2.43 formulė).
2. Vilkikų schemos parinkimas (daugeliu atvejų vienas vilkikas – laivapriekyje, kitas – laivagalyje).
3. Vilkikų traukos jėgos naudojimas – ne daugiau kaip 75–80 % nuo nominalios traukos jėgos arba, siekiant turėti atsargą, rezultata, gautą pagal formulę 2.43, didinant 20 %.
4. Remiantis nustatytos būtinios traukos jėgos duomenimis, vilkimo operacijai parenkamas optimalus vilkikų skaičius, atsižvelgiant į uosto turimų vilkikų galią.
5. Skaičiuojant naudoti šiuos duomenis:
 - laivų registre pateiktus laivo geometrinius parametrus;
 - vėjo ir srovės kryptis bei greitį iš uosto hidrometeorologinės stoties;
 - uosto gylio parametrus, šią informaciją suteikia uosto kapitonas arba saugaus laivybos eismo tarnyba.

Taikant sukurtą matematinį modelį nustatoma būtina vilkikų traukos jėga laivus atšvartuojant nuo krantinės ar juos priešvartuojant prie jos. Matematinis modelis yra universalus, jį galima pritaikyti bet kurio tipo laivams bet kuriame uoste, suvedus kintamuosius dydžius, atsižvelgiant į atliekamos operacijos sąlygas. Tokios išraiškos matematinį modelį patogiu konvertuoti į skaičiuoklę, turint kintamuosius dydžius.

Pažymėtina, kad laivo kapitonas ir locmanas prieš vykdant vilkimo operacijas turėtų:

1. priimti esamas hidrometeorologines ir hidrologines sąlygas;
2. sukurtos metodikos pagrindu, atsižvelgę į laivo parametrus, įvertinti būtiną maksimalią vilkikų traukos jėgą;

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

3. maksimalios vilkikų traukos jėgos pagrindu užsakyti reikiamą vilkikų skaičių;
4. informuoti vilkikų kapitonus apie planuojamo darbo (vilkimo) specifiką.

Sukurtas matematinis modelis gali prisidėti prie navigacinio saugumo uoste užtikrinimo, nes įvertina srovės greitį ir kryptį, vėjo greitį ir kryptį, seklumos poveikį bei laivo charakteristikas. Šių parametrų vertinimas leidžia tiksliau planuoti vilkimo operacijas ir parinkti būtiną vilkikų traukos jėgą, siekiant vykdomos operacijos saugumo.

2.5. Vilkimo lyno įtempimo skaičiavimo metodika

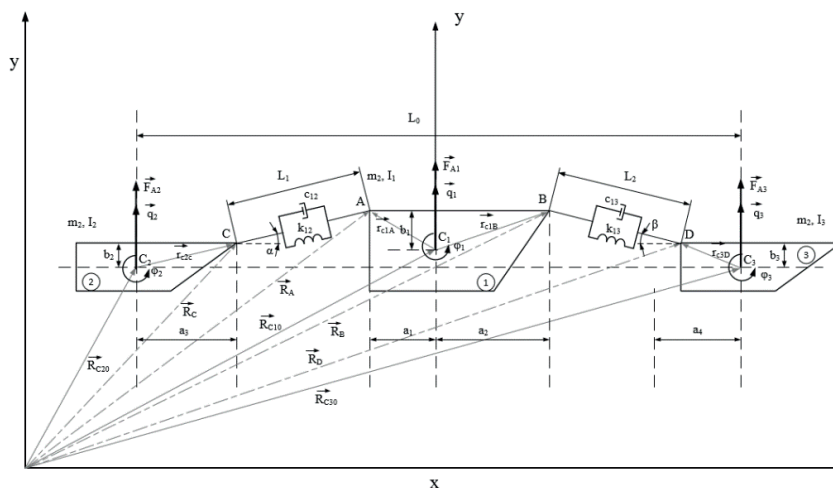
Laivų judėjimas skaičiuojamas vektoriniu metodu, įtraukiant vektorinius ir skaliarinius dydžius, kai veikia įvairios jėgos, esant ir kitoms fizikinėms sąveikoms. Šie skaičiavimai gali būti atliekami įvairiais tikslais, pavyzdžiui, siekiant numatyti laivo trajektoriją, įvertinti vilkimo lynų įtempimus, atliekant manevrus ir kt. Disertacijoje vektoriniu metodu apskaičiuotas vilkimo lynų įtempimas, nes atsižvelgiant į vilkimo lyno vertikalų ir horizontalų kampus, jis gali būti gerokai didesnis už laivo sukuriamas horizontalias jėgas. Vilkimo lynas yra pagrindinis vilkiką ir aptarnaujančią laivą sujungiantis elementas, per kurį perduodama vilkiko jėga, tad jo patikimumas yra svarbus navigacinį saugumą vykdančias vilkimo operacijas lemiantis parametras.

Šiuo atveju vektorinis skaičiavimas pasirinktas, nes leidžia atlikti jėgų, jų krypties ir pasiskirstymo analizę bei įvertinti ne tik pačios jėgos dydį, bet ir kryptį, šis niuansas nagrinėjant lynų įtempimą ypač svarbus. Be to, taikant vektorinį metodą įvertinama sistemos dinamika bei vilkimo sistemą veikiančios jėgos, tai palengvina užduoties sprendimą prireikus įvertinti skirtingų jėgų poveikį. Pagrindiniai elementai ir kintamieji, naudojami atliekant vektorinius laivų judėjimo skaičiavimus, apima šiuos vektorius: poslinkio, greičio, pagreičio, jėgos.

Vykdančias tyrimą taikytas Lagranžo interpoliacija pagrįstas matematinis skaičiavimas, apimantis tris laivus (du vilkikus ir vieną konteinerinį laivą) ir dinamikos matematinį modelį, kuris įvertina laivo masę, inercijos momentą, vilkimo lyno tamprumo ir slopinimo koeficientus. Lagrandžo metodas naudingas, norint išvesti kūnų, kurie juda sistemoje, judėjimo lygtis, žinant tos sistemos kūnus veikiančias jėgas (Jie Xue, Chaozhong Wu ir kt. 2017). Taikant Lagrandžo metodą sudaromos funkcijos, kurios yra potencinės ir kinetinės energijos sumos skirtumas, siekiant išvesti sistemos judėjimo lygtis. Kitaip tariant, nagrinėjamą sistemą veikiančios išorinės jėgos, sukuriama sukimo momentai ir sistemos kūnus veikiančios pagreičiai bei šių jėgų momentų apie bet kurį tašką suma lygi nuliui, kai sistema yra pusiausvyros būsenos arba juda pastoviu greičiu. Principas ypač naudingas išvedant sistemos judėjimo lygtis, atsižvelgiant į apibendrintas koordinatas. Jis leidžia analizuoti sudėtingų mechaninių sistemų dinamiką ir taikytinas įvairiose fizikos bei inžinerijos srityse.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Dinamikos modelis taikomas skaičiuojant šešis būsenos kintamuosius: laivų vertikaliosios poslinkius (q_1, q_2, q_3) ir laivų sukimašį apie svorio centro ašis ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$). Dinamikos sistemos matematinis modelis apima šešias antros eilės diferencialines lygtis. Jos skaičiuotos naudojant *Matlab* programinę įrangą. Diferencialinių lygčių sistema modifikuota matricine forma, kurią sudaro: masių $\{M\}$, slopinimo $\{D\}$ ir standumo $\{K\}$ matricos, būsenos kintamieji $\{q\}$ bei išorinių jėgų $\{F\}$ vektoriai.



2.12 pav. Vilkimo schemos vektorinė schema, kurioje veikia du vilkikai (nr. 2 ir 3), elastingu lynu sujungti su konteineriniu laivu (nr. 3)

Fig. 2.12. Towing scheme vector diagram where working 2 tugs (no. 2 and 3) connected with elastic towing line with container vessel (no. 3)

Matematinis sistemos judėjimo modelis išreikštas matricine forma. Modeliuojant taikyti Klaipėdos uosto vilkikų KLASCO1 ir KLASCO2 bei velkamojo laivo „MSC Topaz“ parametrai, tai vienas didžiausių Klaipėdos uoste apsilankusių laivų. Siekta, kad simuliacija ir matematinis modeliavimas būtų tikroviški ir kuo labiau atitiktų realias situacijas.

Diferencialinių lygčių sistema buvo perrašyta matricine forma ir sudarytos masių $\{M\}$, slopinimo $\{D\}$ bei standumo $\{K\}$ matricos, būsenos kintamųjų $\{q\}$ ir išorinių jėgų $\{F\}$ vektoriai. Sistemos laivų duomenys pasirinkti orientuojantis į Klaipėdos uosto vilkikus KLASCO1, KLASCO2, KLASCO3 ir vieną didžiausių atplaukusių konteinervežių „MSC Topaz“.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Matlab programiniam paketui sukurta modeliavimo programa, sprendžianti diferencialines lygtis ir pateikianti atsakymus – tiek skaitine, tiek grafine formomis. Programoje taikytas ODE23 metodas – tai trižingsnis trečio laipsnio Runge-Kutta'o metodas. Modeliavimo maksimalus žingsnis – ne didesnis nei 0,01 s. Modeliavimo santykinis tikslumas – 10^{-4} .

Modeliavimo rezultatai atskleidė, kad modelis sudarytas teisingai, nes būdama ramybės būsenos sistema joje ir lieka, o pridėjus papildomą išorinę jėgą, kuri veikia trečiąjį laivą – vilkiką, sistema veikiama bangavimo. Pašalinus išorinį poveikį, per tam tikrą laiką ji grįžta į nusistovėjusią būseną ir joje pasilieka. Tad galima teigti, kad tiriamą dinaminę sistemą yra stabili.

Gauti grafiniai visų sistemos laivų vertikaliųjų poslinkių (q_1, q_2, q_3) , vertikaliųjų greičių (v_1, v_2, v_3) , sukimosi apie savo ašį kampų $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ ir kampinių greičių $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ atvaizdai.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [D]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\} \quad (2.45)$$

$$\{q\} = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \\ \varphi_3(t) \end{bmatrix} \quad \{F\} = \begin{bmatrix} F_{A1} - m_1 g \\ F_{A2} - m_2 g \\ F_{A3} - m_3 g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \{M\} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} C_{12} + C_{13} & -C_{12} & -C_{13} & 2(C_{12}r_{C1A} + C_{13}r_{C1B}) & -2C_{12}r_{C2C} & -2C_{13}r_{C3D} \\ -C_{12} & C_{12} & 0 & -2C_{12}r_{C1A} & 2C_{12}r_{C2C} & 0 \\ -C_{13} & 0 & C_{13} & -2C_{13}r_{C1B} & 0 & 2C_{13}r_{C3D} \\ 2(C_{12}r_{C1A} + C_{13}r_{C1B}) & -2C_{12}r_{C1A} & -2C_{13}r_{C1B} & 4(C_{12}r_{C1A}^2 + C_{13}r_{C1B}^2) & -4C_{12}r_{C1A}r_{C2C} & -4C_{13}r_{C1B}r_{C3D} \\ -2C_{12}r_{C2C} & 2C_{12}r_{C2C} & 0 & -4C_{12}r_{C2C}r_{C1A} & 4C_{12}r_{C2C}^2 & 0 \\ -2C_{13}r_{C3D} & 0 & 2C_{13}r_{C3D} & -4C_{13}r_{C3D}r_{C1B} & 0 & 4C_{13}r_{C3D}^2 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{12} + k_{13} & -k_{12} & -k_{13} & 2(k_{12}r_{C1A} + k_{13}r_{C1B}) & -2k_{12}r_{C2C} & -2k_{13}r_{C3D} \\ -k_{12} & k_{12} & 0 & -2k_{12}r_{C1A} & 2k_{12}r_{C2C} & 0 \\ -k_{13} & 0 & k_{13} & -2k_{13}r_{C1B} & 0 & 2k_{13}r_{C3D} \\ 2(k_{12}r_{C1A} + k_{13}r_{C1B}) & -2k_{12}r_{C1A} & -2k_{13}r_{C1B} & 4(k_{12}r_{C1A}^2 + k_{13}r_{C1B}^2) & -4k_{12}r_{C1A}r_{C2C} & -4k_{13}r_{C1B}r_{C3D} \\ -2k_{12}r_{C2C} & 2k_{12}r_{C2C} & 0 & -4k_{12}r_{C2C}r_{C1A} & 4k_{12}r_{C2C}^2 & 0 \\ -2k_{13}r_{C3D} & 0 & 2k_{13}r_{C3D} & -4k_{13}r_{C3D}r_{C1B} & 0 & 4k_{13}r_{C3D}^2 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Rezultatai sugeneruoti modeliuojant operaciją, kurioje dalyvauja du vilkikai ir konteinerinis laivas, atvaizduojant kampinio greičio, poslinkio ir sukimosi grafines schemas. Modelis yra universalus ir gali generuoti įvairius rezultatus bei grafikus pagal kintamus vilkimo lyno elastingumo ir įvairius laivų parametrus.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Vektorinio modelio duomenys:

Inercijos momentai: J_1, J_2, J_3 .

Masė: m_1, m_2, m_3 .

Atstumai: $L_0, L_1, L_2, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$.

Išorinės žadinančios jėgos: F_{A1}, F_{A2}, F_{A3} .

Slopavimo koeficientai: C_{12}, C_{13} .

Tamprumo koeficientas k .

Lyno tvirtinimo taškai: A, B, C, D.

Laivo masės centras: C_1, C_2, C_3 .

Lyno tvirtinimo kampai: α, β .

Atstumas nuo laivo centro iki antstato: b_1, b_2, b_3 .

Veikiantys vektoriai: $\vec{R}_{BD0}, \vec{R}_{C10}, \vec{r}_{C1B}, \vec{R}_{C20}, \vec{r}_{C1A}, \vec{R}_{C30}, \vec{r}_{C1B}, \vec{r}_{C30}$.

Kintamieji: $q_1, q_2, q_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$.

q_1, q_2, q_3 – poslinkiai.

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – posūkiai.

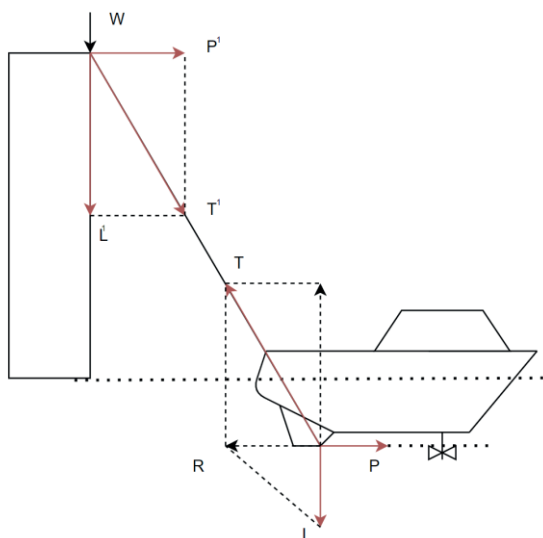
v_1, v_2, v_3 – greičiai.

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – kampiniai greičiai.

Remiantis vektorinio modelio duomenimis, atsižvelgiant į jų kiekį ir skirtingas veikiančias jėgas bei sąveikas, vektorinis metodas leidžia efektyviai atlikti skaičiavimus, kurie susiję su vektoriais ir matricomis, nagrinėjant dinaminės sistemos poslinkį. Šio metodo privalumas – skaičiavimai nesunkiai perkeliama į matematinio skaičiavimo programas (pvz., *Python, Matlab*) bei praktiškai pritaikomi vertinant vilkimo lyno įtempimą. Be to, vektorinio skaičiavimo metodas dažnai leidžia atlikti daugelį skaičiavimų greičiau nei tradiciniais būdais: kai sprendžiant fizikos uždavinį taikomas vektorinis skaičiavimo metodas, galima efektyviai apibūdinti jėgas, greičius ir pagreičius vektoriniais dydžiais bei atlikti skaičiavimus, atsižvelgiant į šiuos dydžius, taip taupant laiką ir didinant skaičiavimo tikslumą. Svarbu pažymėti, kad vektorinio skaičiavimo metodas plačiai taikomas sprendžiant įvairias problemas, taip pat ir uosto vilkikų naudojimo klausimą, siekiant gerinti uoste navigacinį laivybos saugumą.

Kai laivo bortas aukštas, t. y. skirtingi vilkimo lynų tvirtinimo aukščiai, naudingoji vilkiko traukos jėga išsiskaido taip, kaip pateikta 2.13 paveiksle.

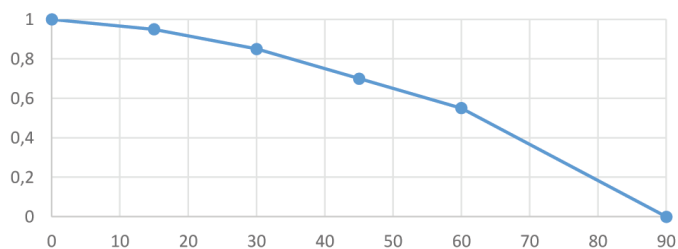
2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas



2.13 pav. Vilkiko naudingosios traukos jėgos išskaidymas, kai vilkimo lynas tvirtinamas gana aukštai

Fig. 2.13. Tug effective bollard pull force when towing line fixing point is high

Vilkiko efektyvumo mažėjimą dėl vilkimo lyno kampo galima išreikšti koeficientu k_α , kuris pateiktas 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Vilkimo lyno įtempimo koeficientas k_α , atsižvelgiant į vilkimo lyno vertikalus kampą α .

Fig. 2.14. Towing line tension coefficient k_α relation with towing line vertical angle α

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

Viena vertus, siekiant sumažinti vilkiko naudingosios jėgos nuostolius dėl vilkimo lyno tvirtinimo aukščio, būtina ilginti vilkimo lyną. Kita vertus, vilkimo lyno ilgimas mažina vilkikų darbo efektyvumą, nes keičiant vilkimo kryptį, vilkikas sugaišta daugiau laiko ir apriboja priplaukimą prie krantinių ar kitų panašių vietų.

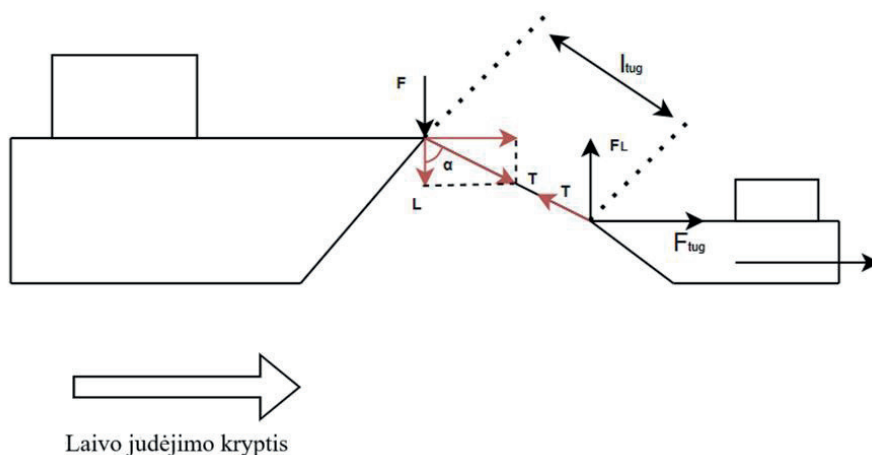
Vilkimo atveju vilkikų sukuriamos jėgos ir momentai (kiekvieno vilkiko) gali būti taip apskaičiuojami:

$$X_{tug} = F_{tug} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (2.49)$$

$$Y_{tug} = F_{tug} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta ; \quad (2.50)$$

$$M_{tug} = Y_{tug} \cdot l_{tug} , \quad (2.51)$$

kur: F_{tug} – vilkikų traukimo jėga; α – horizontalus kampas tarp laivo diametraliosios plokštumos ir vilkimo lyno; β – vertikalus kampas tarp fiksuotų vilkiko ir laivo taškų; l_{tug} – vilkimo jėgos petys. Jėgų pasiskirstymas pavaizduotas 2.15 paveiksle.



2.15 pav. Vilkiko lyną veikiančių jėgų pasiskirstymas

Fig. 2.15. Towing line force distribution

Taikant vektorinį metodą galima įvertinti vilkimo lynų įtempimus, vykdant vilkimo operacijas, kai ribinėmis sąlygomis gali būti pažeistas vilkimo lynas: nutrūkti ir

dėl to sukelti avarinę situaciją vykdant vilkimo operaciją. Be to, vektorinis metodas yra universalus ir leidžia įvertinti vilkimo sistemos dinamiką, kai vilkikai padeda laivui atsišvartuoti nuo krantinės ar prisišvartuoti prie jos, atlikti posūkį ar judėti kanalu.

2.6. Tyrimų tikslumo vertinimo metodika

Vertinant atlikto skaičiavimo ir eksperimentų su realiais laivais bei kalibruotu simulatoriumi rezultatų tikslumą, taikytinas maksimalaus pasiskirstymo metodas (Wu 2012). Maksimalaus pasiskirstymo metodas (angl. *Maximum Distribution Method / Maximum Entropy Method*) yra statistinės analizės ir tikimybių teorijos metodas, taikomas nustatant tikimybių pasiskirstymą, esant ribotam duomenų kiekiui ar apribotoms sąlygoms.

Šis metodas dažniausiai taikomas turint tik kelis duomenis arba nedaug ką nežinant apie duomanų pasiskirstymą, norint sukurti tikslius tikimybių modelius. Maksimalaus pasiskirstymo metodo idėja – ieškoti tokių tikimybių, kurios atitiktų turimus duomenis ir būtų tinkamiausios arba netinkamiausios. Tai reiškia, kad ieškoma tokio pasiskirstymo, kuris turi kuo mažiau papildomos informacijos, kartu atitinka žinomus kriterijus ar reikalavimus.

Maksimalaus pasiskirstymo metodo taikymas dažniausiai apima optimizacijos uždavinį, kurio tikslas – atrasti tokius parametrus, kurie maksimizuočių pasiskirstymo entropiją (tai yra neapibrėžtumą), kartu tenkintų turimus duomenis ar apribojimus. Disertacijos uždavinių sprendimą, taikant maksimalaus pasiskirstymo metodą, turint duomenų masyvus, gautus vykdant eksperimentus su realiais laivais ir naudojant kalibruotą simulatorių, galima išreikšti 2.51 formule, įvertinus vilkikų traukimo jėgą (Petersen 2007):

$$F'_v = F_{v\text{ vid}} + P' \cdot k_n \cdot R_n, \quad (2.52)$$

kur: $F_{v\text{ vid}}$ – vilkikų vidutinė traukos jėga, kai visos kitos sąlygos vienodos.

Gautų rezultatų tikimybė, atsižvelgiant į tikimybinį koeficientą, taip pasiskirsto (Vakrina 2007):

$$P' = 1 - 68,3; 2 - 95,3; 3 - 99,7 \quad (2.53)$$

Remiantis matavimų rezultatais priimamas gautų rezultatų skaičiaus koeficientas k_n (Petersen 2007):

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

$$k_n = 3 - 0,55; 4 - 0,47; 5 - 0,43; 6 - 0,396; 7 - 0,37; 8 - 0,351; 9 - 0,337; 10 - 0,329; 11 - 0,325; 12 - 0,322 \quad (2.54)$$

kur: R_n – matavimo rezultatų nuo didžiausios iki mažiausios reikšmės skirtumas.

Taigi gaunamų tyrimo rezultatų tikslumo tikimybė yra svarbi, nes jais remiantis, naudojant uosto vilkikus, užtikrinamas navigacinis laivybos saugumas. Navigacijoje priimtina 95 procentų saugumo tikimybė, esant ypatingiems atvejams, pavyzdžiui, į uostus įplaukiant SGD tanklaiviams priimama tikimybė – iki 99,7 procento.

Be to, galima laikytis vidutinio gautų rezultatų vidurkio vertinant nuokrypius, kurie nustatyti eksperimentuojant:

$$F'_v = F_{v \text{ vid}} \pm \Delta F_{vil} , \quad (2.55)$$

kur: ΔF_{vil} – vilkikų traukos jėgos pokytis.

Gautos reikšmės yra svarbios nustatant maksimalius galimus nuokrypius, siekiant užtikrinti navigacinį laivybos saugumą parenkant vilkikų traukos jėgą, be to, nustatant būtiną jėgos atsargą siekiant išvengti situacijų, kai vykdant operacijas vilkikų jėgos gali pritrūkti. Taikant maksimalaus pasiskirstymo ir maksimalaus nuokrypio skaičiavimo metodus vertinti tolesniuose skyriuose atlikti eksperimentų rezultatai.

2.7. Skyriaus apibendrinimas

Teorinis aukščiau minėtų skaičiavimų pagrindas – hidrodinamikos ir laivo dinamikos principai, aprašantys, kaip jėgos ir momentai veikia laivo korpusą. Sukurtas matematinis modelis leidžia įvertinti sudėtingas navigacines sąlygas (vėjo ir srovės greičius bei kryptis, seklumos poveikio efektą) ir tiksliau nustatyti būtiną vilkikų traukos ir lynų įtempimo jėgą. Skyriuje pateiktos matematinės išraiškos gali būti pritaikytos, analizuojant ir optimizuojant vilkikų parametrus, siekiant pagerinti laivo valdomumą bei jo manevravimo savybes. Matematinis modelis sudarytas taikant du metodus – d'Alamberto jėgų ir momentų principą bei vektorinį skaičiavimo metodą. Abu jie vertina veikiančias jėgas ir momentus, bet galutinis skaičiavimo rezultatas, modelio lankstumas ir universalumas išryškina tam tikrus vieno ir kito modelio privalumus, kuriuos galima išnaudoti tyrimo rezultatus tikslinant.

2. Vilkikų naudojimo, siekiant gerinti laivybos saugumą uoste, teorinis pagrindimas

D'Alamberto metodo pranašumas tas, kad jis orientuojasi į išorinių ir vilkiko sukuriamų jėgų dedamųjų sumą, kuri yra lyg atsvara, rodanti, kokios vilkikų traukos jėgos reikia, kad būtų atsvertos kitos lygtyje veikiančios jėgos. Skaičiuojant šiuo metodu patogų pridėti veikiančias jėgas ir momentus, taip pildant ir tikslinant matematinį modelį. Vektoriniu metodu atlikti skaičiavimai leidžia tiksliai įvertinti, kaip pridėjus jėgą reaguos sistema, koks bus poslinkis, posūkio kampas ir kampinis greitis, be to, vilkimo lynų poveikį vykdant vilkimo operaciją, kai jie veikia kaip slopinimo elementas, be to, pridėjus žadinančias jėgas gauti galutinius sistemos judėjimo parametrus. Vektoriniu metodu galima tiksliai apskaičiuoti sistemos judėjimą iš statinės padėties, pridėdant žadinančias vilkiko jėgas, tai svarbu atšvartuojant laivą nuo krantines, kai vilkikams padedant laivas startuoja esant nuliniam greičiui.

Laikantis d'Alamberto principo kompleksiskai išanalizuoti laivo ir vilkiko sąveiką veikiančias jėgas, nustatyti pagrindinius navigacinio saugumo veiksnius, kurių pagrindu sudarytas matematinis modelis, ir sukurti vilkikų traukos jėgos skaičiavimo metodiką.

Atlikus išplėstinę palyginamąją analizę, galima skirti šiuos pagrindinius navigacinio saugumo veiksnius, kurių pagrindu sukurtas matematinis modelis:

- vėjo jėga ir kryptis;
- srovės jėga ir kryptis;
- seklaus vandens efektas;
- lyno įtempimas.

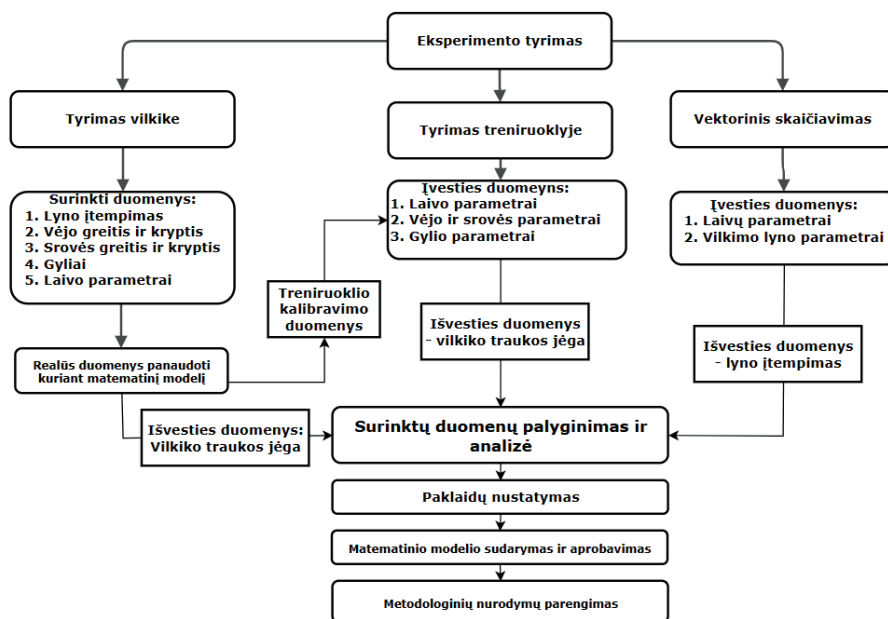
Atsižvelgiant į šiuos pagrindinius veiksnius sukurtas matematinis modelis, leidžiantis šiuos navigacinį saugumą užtikrinančius veiksnius įvertinti, vykdant prišvartavimo, atšvartavimo ar kitas vilkimo operacijas.

Laivo ir vilkiko sąveikos vykdant vilkimo operaciją teorinį pagrindimą galima įvertinti pasitelkus vilkikų poveikio laivo judėjimui duomenis. Be to, reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad konkrečios išraiškos ir jų pritaikymas priklausys nuo daugelio veiksnių, taip pat ir tokių kaip kapitono kvalifikacija, patirtis, pasirinktas vilkimo operacijos vykdymo metodas ir vilkiko tipas. Galimybė tiksliai nustatyti ir apskaičiuoti būtiną vilkikų traukos jėgą bei skaičių, įvertinus tokius papildomus meteorologinius parametrus kaip vėjo stiprumas bei kryptis, gerokai praplečia vilkimo operacijos saugumo galimybes ir leidžia kilstelėti uosto navigacinio saugumo lygį. Vykdant ypač atsakingas ir rizikingas operacijas, tokias kaip laivų manevravimas uoste pasitelkus vilkikus, prisišvartavimas ir atsišvartavimas, remiantis matematiniais skaičiavimais, nustatomi laivų veiksmai galimomis sudėtingomis uosto sąlygomis.

Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

Atliekant mokslinį eksperimentą aprašytais tyrimo metodais ir laikantis atitinkamos tyrimo tvarkos, siekiama iširti vilkikų, įvairių laivų tipų ir parametrų, skirtingų vėjo kryptių ir stiprumo bei srovės poveikį darbui. Eksperimentas atliktas vilkikuose vykdant vilkimo operacijas ir jų metu fiksuojant duomenis bei šiuos rezultatus vėliau lyginant simulatoriuje laboratorijoje. Eksperimento esmė – patvirtinti arba paneigti mokslinę prielaidą, matematinius modelius, remiantis stebėjimais ir duomenimis, kurie renkami kontroliuojamomis sąlygomis, t. y. fiksuojant vilkimo parametrus vilkikams vykdant realias vilkimo operacijas, tyrimus tikslinant simulatoriuje ir duomenis naudojant kaip kalibravimo priemonę. Tyrimai simulatoriuje pasitelkti parenkant vilkimo schemą duotomis eksperimento sąlygomis. Eksperimento tyrimo schemoje (3.1 pav.) pateikiami pagrindiniai tyrimo etapai ir jo vykdymo eiliškumas. Tyrimas suskaidytas į dvi dalis: 1) praktinė, kai atliekami matavimai vilkike, ir 2) eksperimentinė, kai vilkimo operacijos pakartojamos treniruoklyje. Vėliau gauti rezultatai apdorojami ir lyginami, o galutiniame etape panaudojami sudarant matematinį modelį.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos



3.1 pav. Eksperimento tyrimo

Fig. 3.1. Experimental scheme

Eksperimentiniai tyrimo rezultatai kaupiami ir juos apdorojus pateikiami lentelių ir schemų formomis, juos palyginus ir įvertinus tyrimo paklaidas. Remiantis tyrimų rezultatais formuluojamos išvados ir rekomendacijos dėl saugaus laivų plaukimo vykdam vilkimo operacijas.

3.1. Vilkikuose atliktų eksperimentų matavimo įranga ir taikoma metodika

Ruošiantis atlikti tyrimo eksperimentą uosto vilkike svarbu įvertinti visus galimus apribojimus, kurie trukdytų siekti tikslo, tai:

- saugumo reikalavimai fiksuojant rezultatus laive: reikia pasiruošti darbui nepalankiomis meteorologinėmis sąlygomis, esant stipriam vėjui ir bangavimui, laikytis visų saugumo taisyklių, kad būtų išvengta sužalojimų ar kitų nelaimingų atsitikimų;
- žmogiškojo veiksnio poveikis fiksuojant rezultatus: negebėjimas dirbti su matavimo įranga, neteisingas rezultatų fiksavimas gali lemti galutinį rezultatą ir

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

matytis paklaidose, tad prieš pradėdant tyrimą būtina iš anksto pasiruošti dirbti su vilkike esama matavimo įranga.

Atliekant tyrimą svarbu tinkamai parengti veiksmų planą, kaip ir kada bus fiksuojami rezultatai, nes eksperimentas atliekamas vykdant realias vilkimo operacijas uoste įvairiomis meteorologinėmis sąlygomis. Taigi pasiruošti darbui laive – jūroje arba uosto akvatorijoje – ypač svarbu, siekiant eksperimento atlikimo saugumo, užfiksuoti visus būtinus eksperimento rezultatus – tai būtina sąlyga.

Eksperimento aprašymas ir jo etapai:

- 1. Eksperimento prielaidos ir pasiruošimas tyrimui.** Planuojamo tyrimo pradžioje iškeliami prielaidai, kurių norima patikrinti ir išnagrinėti bei iširti galimus ryšius, šiuo atveju meteorologinių ir hidrologinių veiksnių poveikį laivų navigaciniam saugumui uoste.
- 2. Eksperimento vykdymas, matavimai, duomenų kaupimas.** Vykdant eksperimentą vilkimo operacijos metu vilkike stebimi ir fiksuojami darbo parametrai, sukaupti duomenys fiksuojami ir įtraukiami į iš anksto parengtą tyrimo duomenų lentelę. Šiuo atveju tai leidžia įvertinti, kaip kintant vienam arba keliems veiksniams, keičiasi vilkimo sistemos parametrai.
- 3. Duomenų analizė ir palyginimas, rezultatų apdorojimas ir pateikimas.** Vykdant eksperimentą surinkti duomenys analizuojami ir lyginami su teoriniais skaičiavimais. Juos apdorojus, rezultatai pateikiami lentelių ir grafikų formomis, vertinamas atitikimas pirminėms iškeltoms prielaidoms bei nustatomas tyrimo rezultatų tikslumas.
- 4. Išvados ir apibendrinimai.** Remiantis eksperimento rezultatais formuluojamos išvados, pateikiamos rekomendacijos ir pastebėjimai, susiję su tyrimo rezultatais bei jų pritaikymu.

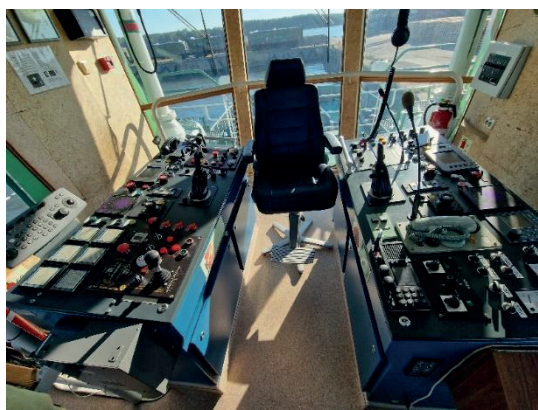
Vykdant eksperimentinius tyrimus ir tikrinant sukurtą vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos metodiką naudota ypač tiksli navigacinė įranga, laivo simulatoriai bei laivuose esama vietos ir judėjimo parametrų registracijos įranga (2.1 lentelė). Matavimo ir parametrų fiksavimo įranga pasirinkta atsižvelgiant į tyrimo rezultatus ir siekiamus surinkti duomenis. Fiksuojama:

- lyno įtempimas;
- variklio galia;
- variklio sraigto apsukos;
- vėjo greitis ir kryptis;
- srovės parametrai.

Dalis eksperimento parametrų fiksuota su vilkikuose esama įranga, kuri naudojama kasdieniame vilkikų darbe.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

Pradėsime nuo vilkiko valdymo tiltelio, kuris suprojektuotas ir pritaikytas dirbti taip, kad pagrindines laivo valdymo funkcijas galėtų atlikti vienas žmogus. Laivo įgulą sudaro trys žmonės: kapitonas, mechanikas ir denio padėjėjas. Vilikikas valdomas dviem svirtimis (angl. *Joistic*), kuriomis reguliuojama variklio galia ir sraigto kryptis. Vilikikas yra ASD tipo (angl. *Azimuth stern drive*), tai reiškia, kad azimuto tipo sraigčiai sumontuoti laivo gale, jie gali sukis 360 laipsnių kampu ir dirbti nepriklausomai vienas nuo kito. Valdymo tiltelyje sumontuota visa būtina įranga vilkiko darbo parametrams stebėti ir fiksuoti bei saugiai naviguoti uoste ir jo prieigose.



3.2 pav. Vilkiko valdymo tiltelis ir jo įranga

Fig. 3.2. Tug controll room

Vilkike sumontuota įvairių darbinių parametų stebėjimo įranga ypač naudinga atliekant eksperimentus realiu laiku, nes leidžia fiksuoti tikslus atliekamų operacijų duomenis esamu momentu. Ši informacija praplečia bei papildo tyrimą ir leidžia tiksliai palyginti teorinius skaičiavimus su realiais parametrais.

Tyrimui naudota duomenų ir parametų kaupimo bei apdorojimo įranga skirstytina į kelias grupes: vilkiko variklio ir pavairavimo mechanizmų parametų fiksavimo; meteorologinių ir laivo navigacinių parametų stebėjimo bei vilkimo parametų fiksavimo.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

3.1 lentelė. Laivų judėjimo ir vilkikų darbo uoste matavimo įranga

Table 3.1. Measurement equipment for vessel movement in port

| Įrangos pavadinimas | Paskirtis | Tikslumas |
|---|---|--|
| Radaras (AIS + ARPA) „JMA-5410 Japan radio“ | Jūrinis radaras, kuriuo aptinkami, fiksuojami uoste judantys laivai ir kiti objektai, jų judėjimo krypties vektoriai. Pagal programos nustatymus įdiegta funkcija, leidžianti vartotojams pažymėti kitus laivus ir lankytinas vietas simboliais bei akimirksniu patikrinti netoliese esančių objektų kursą bei greitį. Ta pati funkcija galima ir AIS simboliams | Fiksuoja iki 180 judančių objektų; AIS judėjimo vektorius fiksuoja nuo 1 iki 120 minučių, pulso dažnis: 0,08 μ s / 2250 Hz 0,25 μ s / 1700 Hz 0,5 μ s / 1200 Hz 0,8 μ s / 750 Hz 1,0 μ s / 650 Hz |
| Satelitinis kompasas „NWZ-4570 Japan radio“ | Momentiniam laivo padėties ir krypties nustatymui. Dažnai naudojamas kaip tikslinantis, papildomas avarinis ar atsarginis prietaisas prie kitos laivų padėties nustatymo ir fiksavimo įrangos | Tikslumas – 15 m naudojant GPS ir iki 5 m naudojant DGPS pagal pozicijos nustatymo standartus |
| Magnetinis kompasas „Cassens & Plath GmbH, Reflecta 1“ | Navigacijos prietaisas, leidžiantis orientuotis pagal pasaulio kryptis. Kompasas turi besisukančią rodyklę, kuri orientuoja šiaurės kryptimi, ir sugraduotą skalę | Tikslumas – 0,5 laipsnio |
| GPS/WASS navigatorius „Furuno“, GP-32 | GPS navigatoriai naudojami laivuose jų padėčiai ir judėjimo kryptčiai nustatyti, be to, žymėti, skaičiuoti ir planuoti judėjimo maršrutus | Tikslumas – 10 metrų veikiant GPS režimu ir iki 3 metrų – plačios aprėpties sistemos režimu |
| Azimutinio propelerio parametrų indikatorius „Rolls-Royce Aquamaster TDI-11“ | Fiksuoja propelerių padėtį, kryptį ir apsisukimus | |

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

| Įrangos pavadinimas | Paskirtis | Tikslumas |
|--|--|-------------------------------------|
| Variklio „Caterpillar 3516 B-HD DITA“ parametrų indikatorius | Fiksuoja veleno apsukas, variklio apkrovą ir perspėja apie gedimus ar kitus smulkius nuokrypius nuo normalaus darbo režimo | |
| Navigacinių žemėlapių monitorius su GPS „Furuno Navnet TZtouch2 TZTL15F ECDIS“ | Realaus laiko uosto jūrinis žemėlapis su integruota uoste judančių objektų vektorių fiksavimo funkcija | Veikimo dažnis – nuo 20 iki 200 kHz |

Vilkiko variklio „Caterpillar 3516 B-HD DITA“ parametrų valdiklis atliekant darbo operacijas praneša pagrindinius rodiklius. Šio dyzelinio variklio maksimalus galin-gumas – 1492 kW, sukimo momentas – 8391 Nm, maksimalios apsukos – 1400 aps./min. Variklis yra V16 tipo, keturių taktų, vilkikas turi po du tokius variklius kiekvie-nam sraigtui. Variklis gali veikti keliais darbo režimais, kurie priklauso nuo operacijos pobūdžio, taip mažinant sunaudojamo kuro ir į orą išmetamo anglies dvideginio kiekį.



3.3 pav. Kairėje – azimuto sraigto „Rolls Royce Aquamaster US 205“ parametrų daviklis („Rolls-Royce Aquamaster TDI-11“), dešinėje – vilkiko variklio „Caterpillar 3516 B-HD DITA“ parametrų valdiklis

Fig. 3.3. Azimut truster „Rolls Royce Aquamaster US 205“ controller on the left picture with parameter indicator („Rolls-Royce Aquamaster TDI-11“) tug engine parameter controller „Caterpillar 3516 B-HD DITA“

Variklio sukuriama galia velenu perduodama azimuto tipo sraigtui „Rolls Royce Aquamaster US 205“. Sraigtas yra 2,2 m skersmens ir turi keturias mentes. Azimuto tipo sraigtai pasižymi tuo, kad gali suktis 360 laipsnių. Vilkike sumontuoti du tokio tipo sraigtai. Jie specialiai sukurti vilkikams, kuriems reikia kompaktiško įrenginio,

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

nes varikliui skirta vieta variklių skyriuje ribota. Daviklis „Rolls Royce Aquamaster US 205“ fiksuoja azimuto sraigto darbo parametrus, rodo sraigto kryptį ir apsukas.

Laivo padėtis ir kryptis nustatoma padėties nustatymo įrenginiu „FURUNO GP-150“. Naudojant šį įrenginį galima realiu laiku stebėti laivo maršrutą ir jo judėjimo kryptį. Be to, planuoti maršrutą, rinkti duomenis apie vėjo kryptį ir stiprumą. Įrenginys suderintas su AIS laivų eismo judėjimo sistema.



3.4 pav. Vilkiko padėties nustatymo įrenginys „FURUNO GP-150“ (kairėje), AIS navigorius „FURUNO GP-150“ (viduryje), satelitinis kompasas NWZ-4570 (dešinėje)

Fig. 3.4. Tug positioning device FURUNO GP-150 (left picture), AIS navigator FURUNO GP-150 (middle picture), satellite compass NWZ-4570 (right picture)

Satelitinis (palydovinis) kompasas rodo laivo padėtį ir koordinates realiu laiku. Dažnai naudojamas ir kaip papildomas įrenginys nustatant laivo padėtį bei jo judėjimo kryptį realiu laiku, ir kaip avarinis arba atsarginis, sutrikus pagrindinių prietaisų veiklai.

Navigacinių žemėlapių monitorius su „GPS Furuno Navnet TZtouch2 TZTL15F ECDIS“ naudojamas kaip radaras ar pagalbinė priemonė naviguoti blogomis oro sąlygomis ar esant prastam matomumui. Monitorius leidžia matyti aplink esančius laivus, naudojantis programa galima matyti judėjimo vektorius ir planuoti kelionės maršrutą. Informacija atnaujinama realiu laiku 1–3 s intervalais. Programos duomenys

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

perduodami AIS sistemai. Navigaciniuose žemėlapiuose rodomas gylis, žymimos nelaimių ar incidentų vietos.

Laive sumontuotas magnetinis kompasas veikia kartu su žemės magnetiniu lauku ir yra pagrindinė posūkio rodiklio priemonė. Jis pateikia suplanuotą reiso maršrutą. Laivo navigacinė įranga paprastai montuojama ties jo vidurio linija kapitono tiltelyje. Magnetinio tipo perdavimo kompasas sumontuotas taip, kad išvesties signalas būtų rodomas navigacinio tiltelio skydelyje.

Vėjo kryptį ir greitį fiksuoja specialus laive esantis daviklis. Vėjo greitis rodomas pasirinktais vienetais: MAZGAI, MP/H, KM/H, M/S, maksimalus vėjo greitis išsaugomas ekrane, kol operatorius nustato iš naujo. Informacija apie vėjo kryptį aiškiai rodoma apskritame šviesos diodų rate. Paryškinta priekinio skydelio grafika iškart rodo vėjo kampą laivo kurso atžvilgiu.



3.5 pav. RMY-06206 vėjo krypties ir stiprumo daviklis

Fig. 3.5. RMY-06206 wind speed and direction indicator

Lyno parametrai, tokie kaip lyno ilgis ir įtempimas, fiksuojami specialiu vilkiko valdymo skydelyje sumontuotu davikliu. Lynas valdomas automatinio būdu iš kapitono tiltelio, atsižvelgiant į tai, kokio lyno ilgio reikia esamoje vilkimo situacijoje.

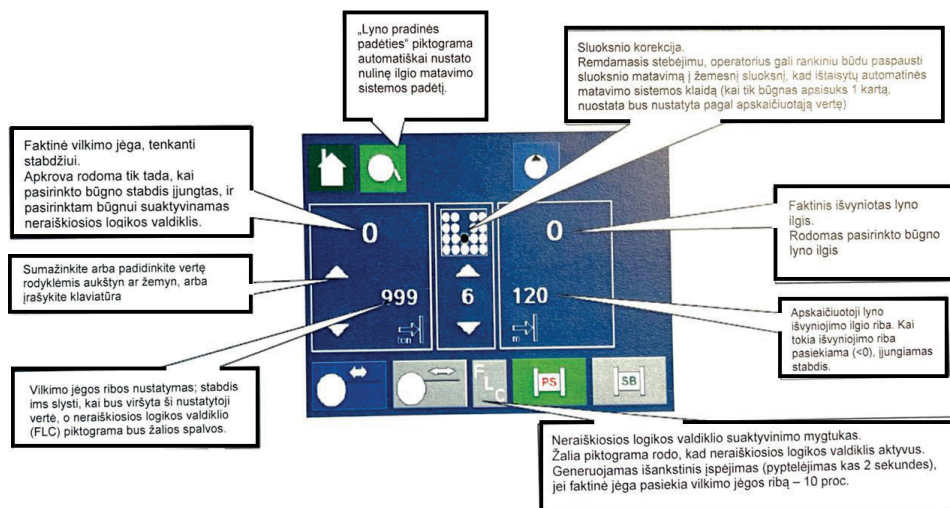
3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos



3.6 pav. Vilkimo lyno valdiklis su įtempimo matavimo davikliu

Fig. 3.6. Towing line winch controller

Valdiklio parametrų nustatymo ir fiksavimo galimybės, leidžiančios tiksliai fiksuoti bei kaupti aktualią informaciją, ypač vykdomą vilkimo operaciją veikiančias jėgas, ir gautus rezultatus lyginti su teoriniais modeliais.



3.7 pav. Priekinės gervės valdiklio schema

Fig. 3.7. Bow towing winch controller scheme

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

Tyrimė pasitelkti įvairūs parametų fiksavimo įrenginiai leidžia kaupti ir analizuoti duomenis, taip praplečiant teorinių matematinių modelių bei simulatoriumi laboratorijos sąlygomis gautų rezultatų tikrinimo galimybes, juos papildant ir patikslinant. Galimybė atlikti eksperimentą realiomis sąlygomis leido geriau suprasti matematinio modelio ribotumą ir susitelkti ties parametrais – jų tikslinimu.

Atliekant tyrimą naudoti matavimo įrenginiai yra esminės patikimos, tikslius duomenis apie vilkiką ir laivą veikiančias jėgas bei sąveiką, esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms, teikiančios priemonės. Surinkti duomenys panaudoti toliau darbe, rengiant ir tikslinant matematinį modelį, kurį taikant būtų galima tiksliai nustatyti būtiną vilkikų traukos jėgą ir skaičių, norint saugiai vykdyti įvairias laivų manevravimo operacijas bet kuriame uoste. Kad modelis būtų veiksmingas, universalus ir lengvai pritaikomas, sukauptą įvairių informaciją galima tiksliai perkelti į matematinį modelį ir jį koreguoti.

Siekiant patvirtinti arba paneigti, praplėsti ir papildyti teorinių tyrimų rezultatus, kad vilkikai gali užtikrinti saugų laivų plaukiojimą uoste, vykdyti praktiniai eksperimentiniai tyrimai uosto vilkike, atliekant didelių laivų prišvartavimo, atšvartavimo, apskukimo ir vedimo uosto kanalais darbus Klaipėdos uoste, aptarnaujant įvairių tipų laivus skirtingomis meteorologinėmis sąlygomis, taip siekiant sukaupti kuo įvairesnės informacijos veikiant realiomis sąlygomis.

3.2 lentelė. Vilkiko pagrindiniai techniniai parametrai

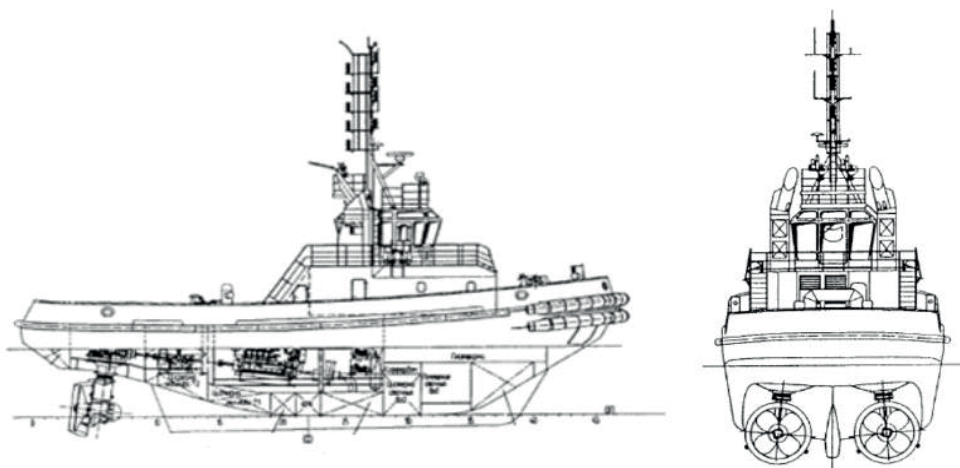
Table 3.2. Tug technical parameters

| Vilkiko tipas | Ilgis (LOA) | Plotis | Grimzlė | Variklių galia | Tempimo jėga |
|---------------|-------------|--------|---------|----------------|---------------|
| ASD | 29,44 m | 10,1 m | 4,6 m | 3370 kW | 55 T (550 kN) |

*ASD – azimuto laivagalio pavara (ang. *azimut stern drive*).

ASD tipo vilkikai yra vieni populiariausių vilkikų tipų įvairiuose pasaulio uostuose (Marcon International 2020). Jie veiksmingai atlieka pagrindines uosto operacijas padėdami laivams manevruoti uoste ir jo akvatorijoje.

Šio tipo vilkikai turi du azimuto sraigtus ir priekinio pavairavimo mechanizmą, kai kurie – ir kintamojo žingsnio sraigtus. Tai tarpinis tarp standartinio klasikinio ir traktorinio vilkikų tipas, išnaudojantis jų abiejų privalumus. Šie vilkikai paprastai turi dvi vilkimo vietas: viena – laivo priekyje, kita – ties viduriu, o pagrindinę galią sukuria du azimuto tipo sraigčiai, sumontuoti laivo gale, kaip klasikinio standartinio tipo vilkikuose.



3.8 pav. ASD tipo vilkiko schema (Klasco, n. d.)

Fig. 3.8. ASD type tyg scheme (Klasco, n. d.)

Eksperimentiniams tyrimams naudoto vilkiko privalumai, palyginti su klasikiniiais fiksuoto sraigto vilkikais:

- stabilesni plaukiant visu greičiu;
- stabilesni veikiant tiek atviruose vandenyse, tiek uosto akvatorijose;
- azimuto sraigčiai (angl. *azipod*) lengvai demontuojami remonto ir aptarnavimo tikslais;
- maža vidutinė grimzlė – apie 4 m;
- universalus veikiant tiek stūmimo, tiek traukimo režimais;
- universalus atliekant įvairias uosto užduotis, kurios apima ne tik vilkimą, bet ir gaisrų likvidavimą, gelbėjimo operacijas, prireikus atlieka ledlaužio funkcijas.

Eksperimentiniams tyrimams naudoto vilkiko trūkumai, palyginti su klasikiniiais vilkikais:

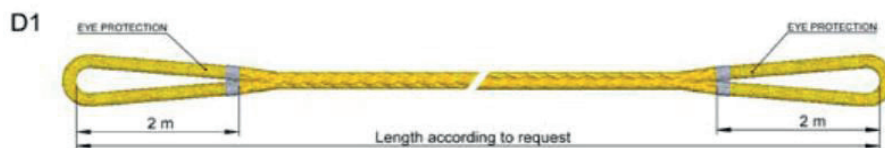
- nepakankamai geros traukos į šoną savybės;
- gana didelė apsisvertimo ir apsijuosimo tempimo lynu, kai laivas prikabinas prie laivagalio, tikimybė;
- sudėtingas valdymas, būtini specifiniai įgulos įgūdžiai;
- didelės eksploatacijos ir priežiūros sąnaudos, sudėtingesnis remontas ir aptarnavimas;
- didesnės kuro sąnaudos, palyginti su klasikiniiais vilkikais, ypač veikiant maksimaliu darbo režimu arba manevruojant sudėtingomis sąlygomis.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

3.3 lentelė. Naudojami lyno parametrai

Table 3.3. Towing tug parameters

| Tipas | Gamintojas | Skersmuo | Maksimalus darbinis įtempimas | Lyno ilgis | 100 m lyno svoris |
|-----------------|-------------|----------|-------------------------------|------------|-------------------|
| „Dynice Towing“ | „Hampidjan“ | 40 mm | 126 T (1260(kN)) | 100 m | 101 kg |



3.9 pav. Lyno schema (Hampidjan, n. d.)

Fig. 3.9. Towing line scheme (Hampidjan, n. d.)

Sklandų vilkiko darbą lemia įvairūs saugiam ir efektyviam darbui atliekant įvairias užduotis uoste ir jų prieigose poveikį darantys veiksniai. Jie apima daugybę kintamųjų, įskaitant aplinkos, eksploataavimo, žmogiškąjį ir vilkiko manevringumo veiksnius. Pateikiame keletą pagrindinių vilkiko darbą lemiančių veiksnių.

Aplinkos sąlygos: tokių veiksnių kaip vėjas, bangos, srovė ir matomumas poveikis vilkimo operacijai gali būti didžiulis. Stiprus vėjas, srovė ir didelės bangos gali apsunkinti vilkimą ir padidinti nelaimingų atsitikimų tikimybę.

Darbinės sąlygos:

- Teisingai parinktas vilkimo lyno ilgis ir stiprumas ypač svarbūs, atsižvelgiant į velkamo laivo dydį, svorį bei vilkimo atstumą, siekiant saugiai atlikti numatytus vilkimo darbus. Vilkimo darbų sauga bei efektyvumas priklauso ir nuo vilkimo įrangos tipo, įskaitant gerves, būklės.
- Manevravimo erdvė ir kliūtys. Didesnė ar mažesnė manevravimo erdvė vilkimo zonoje lemia vilkiko gebėjimą manevruoti saugiai ir efektyviai, nekliudant uosto infrastruktūros bei gretimų laivų, tiltų ar pan. Be to, erdvės reikia norint maksimaliai išnaudoti vilkikų traukos jėgą ir jų manevrines galimybes, siekiant saugiai ir greitai atlikti operaciją.

Laivo charakteristikos: vilkiko ir velkamo laivo dydis, tipas, būklė lemia vilkimo galimybes bei apribojimus, kaip ir velkamo laivo grimzlė, aptakumas, plūdrumo charakteristikos – jo reakciją į sukuriamas vilkimo jėgas vykdant vilkimo operaciją.

Vilkimo operacijos koordinavimas:

- Sklandus vilkiko ir velkamo laivo įgulų narių bei uosto tarnybų, tokių kaip laivų eismo valdymo kontrolė, uosto kapitonas, tarpusavio ryšys ypač svarbus koordinuojant manevrus ir taip minimizuojant galimą riziką.
- Vilkimo planas: parengus išsamų vilkimo planą, kuriame atsižvelgta į visus svarbius veiksnius ir galimus nenumatytus atvejus, didėja vilkimo darbų saugumas bei efektyvumas. Dažnai vilkimo operacijos sėkmė priklauso nuo kruopštaus planavimo, situacijos suvokimo, įgulos narių kvalifikacijos ir saugos protokolų laikymosi įvairiomis vilkimo sąlygomis.

Tyrimai vykdyti su realiais Klaipėdos uoste besilankančiais laivais, kuriuos galima skirstyti į dvi grupes: duomenys kaupti apie reguliariai į Klaipėdos uostą atvykstančius laivus bei apie nereguliariai besilankančius, atsitiktinius laivus, kurie tyrimo vykdymo dienomis lankėsi Klaipėdos uoste ir jiems buvo suplanuota atitinkama vilkimo operacija: vilkikai padėjo laivui manevruoti uosto akvatorijoje, prisišvartuoti bei atsišvartuoti.

Duomenys fiksuoti tą dieną vyravusiomis meteorologinėmis sąlygomis, nuo kurių ir priklausė tyrimų rezultatai. 3.4 lentelėje pateikti pagrindiniai reguliariai Klaipėdos uoste besilankančių laivų, dalyvavusių eksperimentiniuose tyrimuose, parametrai. Stebint šių laivų vilkimo operacijų parametrus įvairiomis meteorologinėmis sąlygomis, galima jas palyginti ir įvertinti operacijų vykdymo tikslumą.

Bandymų sąlygos, tyrimą atliekant realiomis sąlygomis vilkikams vykdant vilkimo operacijas ir padedant laivams manevruoti, sunkiai prognozuotos – neįmanoma numatyti, kokios jos bus tyrimą atliekant, nes meteorologinės sąlygos uoste ar uosto prieigose kartais labai greitai keičiasi, tad naudoti faktiniai hidrometeorologiniai parametrai matuoti vilkikų turima įranga.

Pagrindinis tikslas ir prioritetas buvo surinkti realią informaciją duotuoju eksperimento vykdymo momentu, kai atlikus tam tikrą tyrimų skaičių rinkti duomenys pučiant skirtingo stiprumo ir krypties vėjui. Tyrimas vykdytas plaukiant kartu su vilkiko įgulos nariais, rezultatus fiksuojant kapitono tiltelyje sumontuotais prietaisais. Įrenginių parametrai fiksuoti informaciją įrašant mobiliuoju įrenginiu bei žymint juos tyrimo stebėjimo lape ir vėliau ją analizuojant laboratorijoje. Po aktyviosios tyrimo fazės sukaupti duomenys apie vilkikų išsidėstymą, vilkimo schemas bei judėjimo trajektorijas papildyti duomenimis iš „Marine Traffic AIS“ bazės (MarineTraffic n. d.). Siekiant surinkti kuo įvairesnius duomenis, į atliekamą tyrimą įtraukti skirtingų tipų, tonažo ir geometrinių parametrų (ilgis, plotis, grimzlė, vandentalpa ir kt.) laivai. Šiuo atveju sukaupta informacija apima platų spektrą duomenų, kokios jėgos veikia laivus esant įvairioms situacijoms.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

3.4 lentelė. Tirtų laivų parametrai

Table 3.4. Experimental vessels parameters

| Bandymo Nr. | Laivo tipas | Ilgis (LOA), m | Plotis, m | Grimzlė, m | DWT, T | Bendras tonazas, T |
|-------------|---|----------------|-----------|------------|---------|--------------------|
| 1 | LNG tanklaivis „Isabella“ | 294,9 | 46,4 | 10,8 | 93 080 | 115 405 |
| 2 | LNG „Arctic Voyager“ | 289,5 | 48,5 | 10,3 | 75 434 | 118 571 |
| 3 | Sausakrūvis „Alanya M“ | 186,5 | 30,0 | 11 | 41 327 | 25 065 |
| 4 | Sausakrūvis „Ece Nur Bayraktar“ | 196 | 32 | 12,5 | 58 449 | 34 422 |
| 5 | Konteinerinis OOCL RAUMA | 168 | 27 | 8,5 | 17 892 | 17 488 |
| 6 | LNG tanklaivis „Marran GAS ULYSSES“ | 290 | 46 | 11,7 | 92 621 | 113 502 |
| 7 | Cheminių medžiagų tanklaivis „Lagertha“ | 161 | 22 | 7 | 19 999 | 12 619 |
| 8 | Naftą gabenantis tanklaivis KIISLA | 139 | 22 | 8,9 | 14 750 | 9910 |
| 9 | Naftą gabenantis tanklaivis SKS DODA | 259 | 45 | 8,5 | 119 456 | 65 911 |
| 10 | Konteinerinis laivas „Sparrow“ | 238 | 39 | 9,1 | 69 890 | 64 500 |
| 11 | Cheminių medžiagų tanklaivis „Stn Nordic“ | 144 | 23 | 6,5 | 16 657 | 11 943 |

Atliekant eksperimentus ir fiksuojant rezultatus realiomis sąlygomis sukaupta tolesniems tyrimams svarbi informacija, apimanti teorinius ir praktinius skaičiavimus, kurių galutinis tikslas – patikslinti sukurta patikimą metodiką, kuri leidžia apskaičiuoti optimalų vilkikų skaičių esant įvairioms hidrometeorologinėms sąlygoms (skirtingoms vėjo ir srovės kryptims bei greičiams), siekiant užtikrinti saugią laivybą uoste ir jo prieigose. Eksperimentų rezultatai rinkti vilkikams atliekant įvairias operacijas, esant skirtingoms vilkimo schemoms.

Siekiant įvertinti surinktų duomenų tikslumą pasirinkti statistiniai vertinimo metodai, atitinkamomis formulėmis (2.52 ir 2.54) nustatant paklaidų ribas. Vykdam eksperimentą atlikta 11 matavimų, iš kurių surinkta informacija apie vilkiko traukos jėgą, lyno įtempimą, variklio galią. Paklaidos skaičiuotos taikant laivyboje priimtą 95 % saugumo tikimybę.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

Duomenis, kurie sukaupti esant skirtingoms vilkimo schemoms ir meteorologinėms sąlygoms, buvo galima panaudoti palyginamiesiems tyrimams, tikrinant matematinio modelio efektyvumą bei tikslumą. Gautus rezultatus apibendrinus, pateiktos metodinės rekomendacijos.

3.2. Simuliatoriuje atliktų eksperimentų matavimo įranga ir metodika

Simuliatoriumi „SimFlex Navigator“ modeliuojami uosto parametrai, tiriami laivų plaukimo, vilkikų darbo ypatumai, esant ribinėms sąlygoms. Vizualieji laivo tiltelio simulatoriai „SimFlex Navigator“ (SimFlex 2012) ir „Simflex 4“ (SimFlex 2014) sukalibruoti, atsižvelgiant į realius laivus ir naudoti įvairioms sąlygoms uoste ir laivų manevrinėms savybėms, esant įvairioms sąlygoms, atkurti, siekiant tirti laivų manevrines savybes ir uosto infrastruktūros elementų suderinamumą bei vilkikų darbo ypatumus. Simulatorius leidžia sukurti įvairias laivų manevravimo, uosto infrastruktūros parametrų (gylio, kanalų pločio, kanalų ir akvatorijų apribojimų, hidrometeorologinių, matomumo, laivų judėjimo ir prasilenkimo) sąlygas, įvertinti hidrodinaminį laivo ar bet kurios kitos kliūtis (sekluma, krantinė, prišvartuoti laivai ir panašiai) poveikį.



3.10 pav. Simuliatorius „SimFlex Navigator“ (autoriaus nuotrauka)

Fig. 3.10. Simulator „SimFlex Navigator (author photo)

Simulatoriaus sistemos dalis – kalibruoti laivai, pradedant nedideliais laivais, pavyzdžiui, vilkikais, ir baigiant dideliais konteinernežiais ar labai didelės talpos (ULCC klasės) naftos tanklaiviais. Simuliatoriuje pateikti įvairių uostų (apie 20) ir vandens kelių duomenys. Juo gaunamų rezultatų (laivo trajektorijos, greičio, kampinio sukimosi greičio, vilkikų darbo parametrų ir kt.) tikslumas atitinka „E-Sea Fix“ sistemos tikslumą.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

Moksliniams uosto plėtros ir navigacinio laivybos saugumo, naudojant vilkikus, tyrimams atlikti sistemoje įdiegti uosto krantinių fragmentai, tokie kaip atmušai, laivų švartavimo stulpeliai ir panašiai. Atlikus eksperimentą realiomis sąlygomis jį galima pakartoti atliekant tyrimus simulatoriuje, nes kartojant daug kartų galima įvertinti, kaip skirtingai veikia, patikrinti, kaip praktiniai rezultatai sutampa su teoriniais. Šiuo atveju svarbu pažymėti, kad turint realius rezultatus, esant tam tikroms sąlygoms, galima įvesti jėgų ir kitų parametrų kalibravimo koeficientus, kad jie atitiktų realias sąlygas ir leistų simulatoriuje atkartoti realią vilkimo operaciją.

Simulatoriuje gaunami 3D ir 2D tiriamų vietų vaizdai. Jis turi laivo tiltelio valdymo bloką, kur įdiegta visa navigacinė ir laivo valdymo sistema. Simuliuojant renkami šie duomenys: laivo, vilkikų ir aplinkos parametrai; laivo koordinatės ir trajektorija; laivo greitis; laivo kampinio sukimosi greitis, kiti parametrai: laivo mašinos, stūmų, sraigto (sraigto), vairo plokštės darbo, laivo dreifo, vilkikų lynų įtempimo, klirenso po laivo kiliu, laivo bendro grimzlės padidėjimo ir supimosi, gylio po laivo korpusu keliuose taškuose (iki 8 taškų), vėjo, srovės, bangavimo, be to, galima nustatyti dienos ir nakties bei riboto matomumo situacijas.

Taigi vizualieji laivo tiltelio simulatoriai leidžia vykdyti laivo manevravimo uoste tyrimus ir suderinti juos su uosto infrastruktūros elementų parametrais, be to, atlikti įvairius bandymus, gautus rezultatus vėliau tikrinant realiomis sąlygomis su realiais laivais, vilkikais, naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą, pavyzdžiui, „E-Sea Fix“ sistemą, laivų eismo reguliavimo sistemą (VTS) arba VTS-LERS.

Simulatoriaus kalibravimo tvarka:

1. Į simulatorių suvesti duomenys, gauti atliekant realius bandymus, tokie kaip vėjo greitis ir kryptis, gyliai, srovės greitis ir kryptis, velkamo laivo parametrai, vilkikų variklių galia ir kt.
2. Fiksuoti simulatoriumi gauti rezultatai.
3. Realųjų eksperimentų bandymų duomenys palyginti su simulatoriumi gautais rezultatais ir apskaičiuoti kalibravimo koeficientai, įvertinus realios laivo operacijos ir analogiškų simulatoriumi gautų rezultatų skirtumą.

Tolesni tyrimai atlikti tokia tvarka:

- Į simulatorių suvesti duomenys, gauti atliekant realius bandymus, tokie kaip: vėjo greitis ir kryptis, gyliai, srovės greitis ir kryptis, velkamo laivo parametrai, vilkikų variklių galia ir kt.
- Fiksuoti kalibruotu simulatoriumi gauti rezultatai.
- Realųjų bandymų duomenys palyginti su tais, kurie gauti kalibruotu simulatoriumi, bei matematinio modeliavimo rezultatais.

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

3.5 lentelė. Laivų judėjimo ir vilkikų darbo uoste matavimo įranga

Table 3.5. Measurement equipment for vessel movement in port

| Įrangos pavadinimas | Paskirtis | Tikslumas |
|---|---|--|
| Simulatorius (SimFlex 2012; SimFlex 2014) | Atlikti laivo valdomumo tyrimus, laivo valdomumo ir uosto infrastruktūros elementų parametrų tarpusavio ryšio bei vilkikų darbo parametrų tyrimus, įvairius eksperimentus, kuriais gautus rezultatus vėliau būtina patikrinti realiomis sąlygomis su realiais laivais, naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą, pavyzdžiui, „E-Sea Fix“ sistemą, laivų automatinio nustatymo (reguliavimo) sistemą AIS arba AIS-LERS | GPS – 3÷5 m; DGPS režimo (nutolimas nuo DGPS atraminių stočių – iki 10 jūrmylių) tikslumas – iki 0,5 m, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greitį, pagreitį, DGPS pataisas; RTK režimo, naudojantis RTK atramine stotimi, kuri nutolusi iki 10 jūrmylių, – ne daugiau kaip 3–5 cm, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greitį ir pagreitį. Padėties fiksavimo tikslumas: horizontalus – ne daugiau kaip 10 mm; vertikalus – ne daugiau kaip 40 mm; objekto greitis – iki 1 cm/s; kursas (kryptis) – iki 0,2 laips.; objekto kampinis sukimosi greitis – iki 0,3 laips./min. |

Vykdamt simuliacinius tyrimus nagrinėti pagrindiniai laivo priešvartavimo / atšvartavimo ir laivų vedimo uostų kanalais scenarijai. Tai tipinės vilkikų darbo uoste užduotys. Gautų būtinų vilkikų traukos jėgos skaičiavimo rezultatų tikslumas tikrintas „SimFlex Navigator“ simulatoriumi. Eksperimentai buvo atliekami panašių parametrų laivuose ir vilkikuose analogiškoms sąlygomis vykdamt tas pačias laivų švartavimo operacijas. Eksperimentuojant vilkimo lyno įtempimas vilkiko lyno įtempimo įrašymo įrenginiu matuotas kas 10 s. Taikant stūmimo ir traukimo metodą, vilkikų variklio galia fiksuota jo pagrindinio variklio registratoriumi kas 10 s. Atsižvelgiant į momentinę pagrindinio vilkiko variklio galia, teoriškai apskaičiuota laivo sraigto įrašos jėga (vilkiko stūmimo ir traukimo jėga). Gauti eksperimentiniai rezultatai, juos apdorojus maksimalaus pasiskirstymo metodu, palyginti su teoriniu skaičiavimo metodu ir simulatoriumi gautais rezultatais.

Kalibruoto simulatoriaus tyrimo rezultatai panaudoti kaip teorinių ir praktinių eksperimentų palyginimo priemonė. Naudojant simulatorių galima užduoti visus pagrindinius parametrus: vilkiko krypties vektorių, variklio galia, srovės greitį ir kryptį, vėjo greitį, bangavimo parametrus, gylį, vilkiko ir laivo greitį. Simulatoriumi galima gauti operacijos vykdymo duotuoju metu rezultatus, suvedus esamus arba norimus parametrus, pagal kuriuos bus vykdoma laivų manevravimo ar jų vilkimo uoste operacija. Simulatoriaus trūkumai:

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

- Norint naudotis simulatoriumi reikia turėti specifinių žinių.
- Simulatoriai yra brangūs, tad uosto vilkikų bendrovės dažnu atveju neturi lėšų jų įsigyti ir juos išlaikyti.
- Simulatoriai paprastai yra mokomoji, tiriamoji priemonė mokymosi įstaigoms ar laboratorijoms, dėl to dažnu atveju prieinami ne visą parą.
- Simulatorių būtina kalibruoti, nes neįmanoma į jį įvesti visų galimų parametrų, pavyzdžiui, simulatoriuje įvestas konkretaus tipo laivas, kurio grimzlė yra 10,5 m, o realaus tokio pat tipo laivo grimzlė – 10,1 m ir t. t.
- Simulatorius neatsako į klausimą, kaip vilkikus išdėstyti vykdant operaciją, nes tai daroma iš anksto dėliojant tyrimų scenarijų. Be to, jis neduoda išvesties rezultatų, koks būtinas vilkikų skaičius ir vilkimo jėga.

Simuliacinio eksperimento tikslas – sužinoti, ar vilkikas gali valdyti laivą; padėti jam manevruoti kritinėje situacijoje, kad būtų išvengta nelaimingų atsitikimų ir nuostolių; įvertinti minimalaus vilkikų skaičiaus skaičiavimo metodikos efektyvumą, esant įvairioms nestandartinėms situacijoms. Verta paminėti, kad eksperimentui pasirinkti kroviniai sausakrūviai ir konteineriniai laivai sudaro 48 % visų Baltijos jūroje plaukiojančių laivų, o nelaimingų atsitikimų priežasčių aspektu variklio gedimo problemos sudaro 35 % visų incidentų priežasčių, kurias lemia techninės laivų problemos (HELCOM 2018). Sausakrūviai laivai gali būti dviejų pagrindinių tipų – generaliniai ir biriųjų krovinių. Šių tipų laivai dažniausiai turi dyzelinį variklį ir vieną sraigatą. Dažnu atveju tokių tipų laivų manevringumas esant stipriam vėjui bei srovei dėl bendros laivų konstrukcijos ir formos yra menkas.

3.6 lentelė. Simuliacinio eksperimento laivų parametrai

Table 3.6. Simulation experiment vessel's parameters

| Laivo tipas | Ilgis | Plotis | Grimzlė | Vilkiko tempimo jėga |
|---------------|-------|--------|---------|----------------------|
| Sausakrūvis | 218 m | 32 m | 12 m | |
| Konteinerinis | 238 m | 32 | 9,1 m | |
| Vilkikas | 32 m | 14,5 m | 5,5 m | 60 T (600 kN) |

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos



3.11 pav. Eksperimentui parinktas sausakrūvis laivas (kairė), konteinerinis laivas (viduryje) ir vilkikas (dešinėje) (Alexander Arnfinn Olsen 2023) („Vecteezy“ nuotrauka)

Fig. 3.11. Experimental vessels visualization bulker (left), container vessel (middle) and port tug (right) (alexander Arnfinn Olsen 2023)(photo by Vecteezy)

Laivo atšvartavimas ir vedimas uosto kanalu pasitelkus vilkikus, kaip pavyzdys pateikiamas nagrinėjant konteinerinį laivą, kurio ilgis siekia 238 metrus. Tai didžiausias prie krantinės nr. 127 Klaipėdos uoste galintis prisišvartuoti laivas, todėl nagrinėjamos laivo atsišvartavimo ir pajudėjimo nuo krantinės operacijos esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms. Remiantis uosto kapitono išleistomis rekomendacijomis, didžiųjų laivų laivyba uoste, jų įplaukimas ir išplaukimas ribojami, kai vėjo greitis siekia 14 m/s. Tirti pasirinktos trys vėjo kryptys: šiaurės (Š), vakarų (V), pietų (P). Siekiant užtikrinti maksimalų navigacinį saugumą uoste, uosto tarnyba turi tinkamai įvertinti būtiną minimalų vilkikų skaičių ir jų traukos jėgą, esant parinktomis vėjo kryptims ir vėjo greičiui bei konkreitiems srovės parametrams. Atvejo analizei teoriškai apskaičiuoti būtini traukimo jėga ir vilkikų skaičius, atlikti imitaciniai testai ir patikrinti panašūs realūs atvejai (su realiais laivais), siekiant nustatyti būtiną vilkikų traukos jėgą, jų skaičių bei lynų įtempimo jėgą vykdant operaciją.

3.3. Skyriaus apibendrinimas

Siekiant sukurti patikimą ir tikslią optimalaus vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos plaukiant įvairiomis sąlygomis nustatymo metodiką, taip užtikrinant laivybos saugumą uoste, pasirinkta atlikti teorinį eksperimentą simulatoriuje ir praktinį eksperimentą vilkikuose, fiksuojant duomenis realiomis sąlygomis, vėliau juos lyginant ir įvertinant paklaidas. Pagrindinis dėmesys skiriamas duomenų rinkimo ir analizės priemonėms.

Matavimams vilkike atlikti pasirinkta ypač tiksli matavimo įranga (žr. 3.2 lentelę), kuria rinkti šie duomenys: vėjo kryptis ir stiprumas, naudojama variklio galia, lyno įtempimas.

Simuliaciniams tyrimams pasirinktas laivo tiltelio simulatorius (žr. 3.5 lentelę), leidžiantis tiksliai atkurti įvairias laivų manevravimo situacijas ir palyginti gautus rezultatus su realių operacijų rezultatais. Siekiant užtikrinti tyrimo rezultatų tikslumą,

3. Eksperimentinių ir simuliacinių tyrimų metodikos

simulatorius kalibruotas, kad būtų pasiektos kuo artimesnės sąlygos su realiai vykdytais eksperimentais.

Eksperimentiniais tyrimais siekta surinkti matematiniam modeliui aprobuoti būtiną informaciją. Bandymai atlikti realiuose vilkikuose ir naudojant kalibruotą simulatorių, pastaruoju išnagrinėti realūs atvejai rodo matematinių skaičiavimų atlikimo poreikį, jais remiantis būtų galima prognozuoti laivų manevrines savybes ir taip užtikrinti navigacinį saugumą uoste.

Rezultatų tikslumas vertintas statistiniais matavimo būdais, priėmus laivybos saugumo užtikrinimo tikimybę 95 %.

Atlikus eksperimentinius tyrimus galima pateikti šiuos apibendrinimus:

- Matematinis modelis, kurį taikant galima nustatyti būtiną vilkikų traukos jėgą ir skaičių esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms, leistų pagerinti navigacinio saugumo uoste situaciją.
- Aiškios rekomendacijos ir kriterijai, pasitelkus matematinius skaičiavimus, leistų mažinti su vilkikų operacijomis susijusias rizikas, padedant laivams manevruoti uoste ir taip užtikrinti navigacinį saugumą.

Taigi galima teigti, kad daugeliu atvejų uosto vilkikas gali padėti minimizuoti avarijų skaičių ir kritinėse situacijose išvengti nelaimių bei nuostolių. Taikydamos matematinį modelį uostų direkcijos, vilkikų įmonės, laivų savininkai galėtų geriau pasiruošti laivų vilkimo darbams, tinkamai įvertinti rizikas, kad būtų išvengta nelaimingų atsitikimų, be to, numatyti optimalų operacijose dalyvaujančių uosto vilkikų skaičių, kad vilkimas, atsižvelgiant į laivo dydį, hidrometeorologines ir hidrologines sąlygas, būtų veiksmingas.

Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą

Teoriniai ir eksperimentiniai rezultatų palyginamieji tyrimai – tai būdas vertinti, kaip teorinis modelis atitinka realią situaciją, pavyzdžiui, šiuo atveju surinkti realių veikiančių laivo ir vilkiko sistemų operacijos duomenys papildyti teoriniais matematinio modelio skaičiavimais. Palyginamaisiais tyrimais vertinti teoriniai modeliai, tikrinant jų efektyvumą ir nustatant atitikimą realioms sąlygoms, siekiant matematinį modelį aprobuoti. Be to, įvertintos tyrimo rezultatų paklaidos patikimumo tikimybę priimant 0,95, nustatyti paklaidų intervalai.

4.1. Eksperimentinio tyrimo rezultatai ir jų vertinimas

Surinkta 11 eksperimentinių bandymo rezultatų įvairiomis išorinėms sąlygomis, aptarnaujant skirtingų tipų ir ilgio laivus. Fiksuoti šie pagrindiniai parametrai: laivo geometriniai, vėjo greitis ir kryptis, vilkiko variklio apsukos, variklio naudojama galia, lyno ilgis bei jo įtempimo jėga. Pagrindinis praktinių eksperimentų tikslas – surinktą informaciją palyginti su disertacijos autoriaus sukurto teorinio matematinio modelio rezultatais, siekiant patikrinti pastarųjų patikimumą ir tikslumą. Atlikto tyrimo rezultatai pateikti 4.1 lentelėje). Keleto bandymų rezultatai, detalizuojantys atlikto bandymo rezultatus ir atskleidžiantys tyrimo eigą bei ypatybes, disertacijoje pateikti grafikais ir schemomis.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

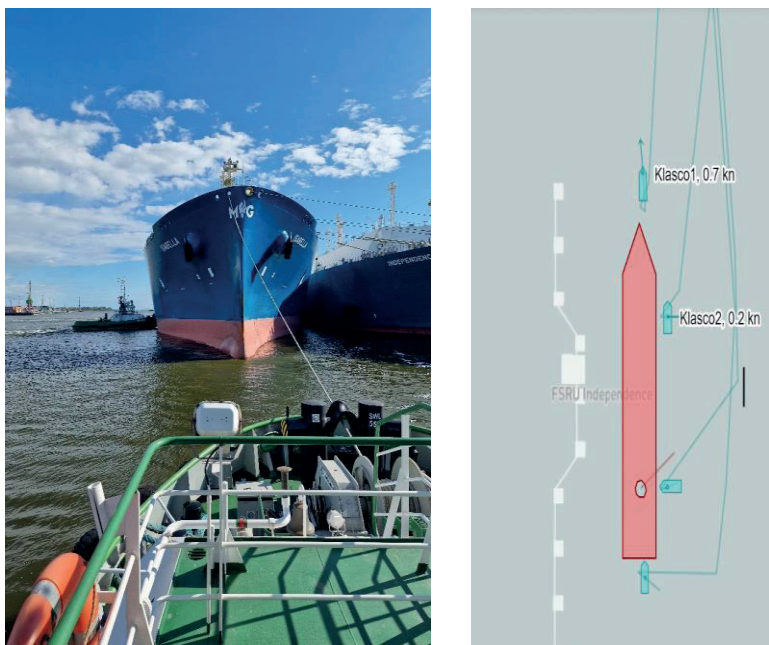
4.1 lentelė. Lyno įtempimo vilkimo procese bandymo rezultatai

Table 4.1. Experimental results

| Bandymo numeris pagal 3.4 lentelės laivų eilę | Vėjo greitis | Vėjo kryptis | Srovės greitis | Srovės kryptis | Variklio galia vykdant operaciją | Paduoto lyno ilgis | Lyno įtempimas, fiksuotas vykdant operaciją |
|---|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------------------------|--------------------|---|
| 1 | 8 m/s | 335 (ŠV) | 0,3 m/s | Į jūrą | 70 % | 62 m | 45 T (450 kN) |
| 2 | 6 m/s | 335 (ŠV) | 0,3 m/s | Į jūrą | 50 % | 40 m | 35 T (350 kN) |
| 3 | 5 m/s | 335 (ŠV) | 0,2 m/s | Į jūrą | 70 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 4 | 5 m/s | 270 (V) | 0,2 m/s | Iš jūros | 50 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 5 | 8 m/s | 335 (ŠV) | 0,3 m/s | Į jūrą | 50 % | 62 m | 45 T (450 kN) |
| 6 | 10 m/s | 270 (V) | 0,5 m/s | Iš jūros | 90 % | 40 m | 50 T (500 kN) |
| 7 | 10 m/s | 335 (ŠV) | 0,5 m/s | Į jūrą | 70 % | 35 m | 45 T (450 kN) |
| 8 | 12 m/s | 360 (Š) | 0,5 m/s | Iš jūros | 90 % | 55 m | 50 T (500 kN) |
| 9 | 12 m/s | 360 (Š) | 0,5 m/s | Iš jūros | 70 % | 37 m | 45 T (450 kN) |
| 10 | 9 m/s | 135 (PV) | 0,3 m/s | Į jūrą | 50 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 11 | 10 m/s | 335 (ŠV) | 0,3 m/s | Į jūrą | 50 % | 45 m | 40 T (400 kN) |

Nagrinėtose vilkimo operacijų schemose dalyvauja vidutiniškai nuo dviejų iki keturių vilkikų. Matavimai atlikti viename iš operacijoje dalyvaujančių vilkikų, nes svarbu nustatyti būtiną maksimalią labiausiai apkrauto vilkiko traukos jėgą. Tokia eksperimento metodika, remiantis situacijos analizės rezultatais ir matematiniu modeliu, taikoma nustatant maksimalią traukos jėgą, kuri matuojama viename iš labiausiai apkrautų vilkikų (žr. 4.3 lentelę). Siekiant minimizuoti atsitiktines paklaidas eksperimentas kartotas ne mažiau kaip dešimt kartų. Žemiau pateikiami eksperimentų pavyzdžiai su schemomis.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



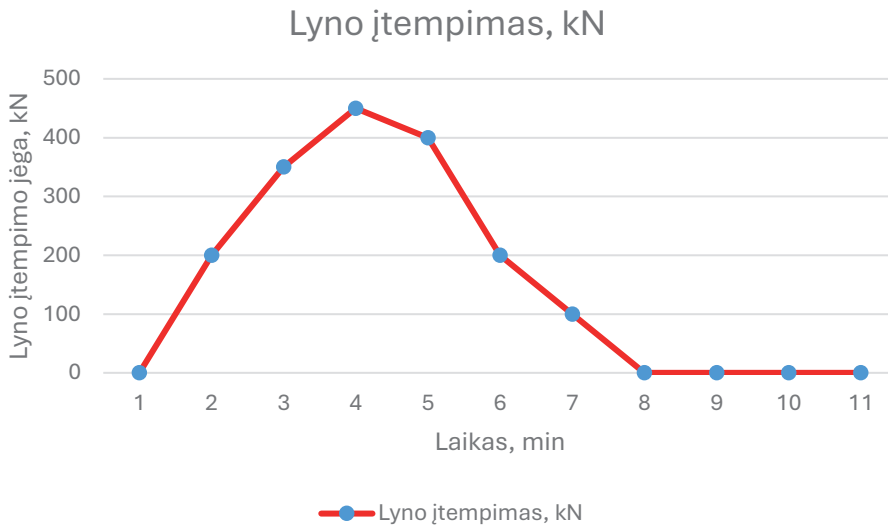
4.1 pav. Duomenų fiksavimas vilkikui vykdant LNG laivo „Isabella“ atšvartavimo operaciją (2022-08-09). Pateiktas vaizdas iš vilkiko (KLASCO 1) kapitono tiltelio (kairėje) ir vilkikų išsidėstymo schema (MarineTraffic n. d.)

Fig. 4.1. Data recording for the tugboat during the mooring operation of the LNG ship Isabella (2022-08-09) view from the bridge of the tugboat captain on the left pic. and diagrama of towing scheme in right (MarineTraffic n. d.)

SGD tanklaivio „Izabela“ vilkimo operacijoje naudoti keturi taip išsidėstę vilkikai: po vieną – laivapriekyje ir laivagalyje su vilkimo lynais, du vilkikai – prie dešiniojo aptarnaujamo laivo borto, veikiantys stūmimo-vilkimo būdu. Vilkikų išsidėstymo schema ir judėjimo vektoriai gauti iš „Marine Traffic“ duomenų bazės, kuri realiu laiku stebi laivų judėjimą AIS laivų stebėjimo sistema (Marine Traffic n. d.).

4.1 paveiksle pateikta schema, kai vilkikams atliekant operaciją duomenys fiksuoti iš vilkiko, kuris lynu prisikabinęs prie laivo priekio. Šiuo atveju vykdoma laivo, kuris prisišvartavęs prie suskystintųjų gamtinių dujų terminalo laivo, atšvartavimo operacija. Tokiomis sąlygomis atliekant eksperimento matavimus pasiekti šie tikslai: įvertintas vilkimo schemas efektyvumas bei surinkta informacija apie naudotą vilkiko traukimo ir lyno įtempimo jėgą, siekiant saugiai įvykdyti atšvartavimo operaciją tos dienos meteorologinėmis sąlygomis.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą



4.2 pav. Lyno įtempimo jėgos pasiskirstymas vykdant vilkimo operaciją, vilkikui esant laivapriekyje

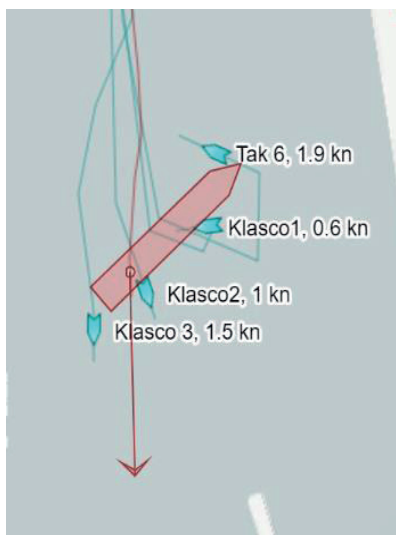
Fig. 4.2. Distribution of the towing line tension force during the towing operation when the tug is operating from the bow

Vykdant operaciją pasiekta maksimali lyno įtempimo jėga – 450 kN. Šiuo atveju vilkikas – laivo priekyje. Tokioje situacijoje priekyje esančiam vilkikui tenka pagrindinė užduotis – suteikti aptarnaujamam laivui greičio, kad būtų galima ištempti laivą į laivybos kanalą. Atlikus šį manevrą lyno įtempimas mažėja, vilkikas nebenaudo-damas savo galios toliau lydi laivą plaukdamas priekyje visa uosto akvatorija iki pat uosto vartų.

4.3 paveiksle pateiktoje schemoje vilkikams vykdant operaciją duomenys fiksuoti iš vilkiko, kuris lynu prisikabinęs prie laivo galo. Vykdoma laivo, kuris prisišvartavęs prie suskystintųjų gamtinių dujų terminalo laivo, atšvartavimo operacija. Tokiomis sąlygomis atliekant eksperimento matavimus įgyvendinti šie tikslai: įvertintas vilkimo schemos efektyvumas; surinkta informacija apie naudotą vilkiko galią ir lyno įtempimo jėgą, siekiant saugiai įvykdyti atšvartavimo operaciją tos dienos meteorologinėmis sąlygomis. Vykiant SGD tanklaivio „Arctic Voyager“ vilkimo operaciją naudoti keturi taip išsidėstę vilkikai: po vieną vilkiką – laivapriekyje ir laivagalyje, du vilkikai – prie dešiniojo laivo borto. Operacijos parametrai fiksuoti iš laivagalyje veikiančio vilkiko. Vilkikų išsidėstymo schema ir judėjimo vektoriai – iš „Marine Traffic“ duomenų bazės. Vykiant operaciją maksimali lyno įtempimo jėga – 350 kN. Lyno įtempimo grafikas vykdant operaciją pateiktas 4.4 paveiksle. Vykiant operaciją

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

staigiu manevru išjudinus laivą lyno įtempimas mažėja, vilkikas savo galios nebenaudoja, bet išlieka sujungtas lynu, kol laivas savarankiškai įplaukia į laivybos kanalą. SGD laivams laikantis nustatytos saugumo procedūros, tai išlieka lydint laivą visa uosto akvatorija iki uosto vartų, kad jo gedimo atveju vilkikas galėtų padėti jį valdyti arba stabdyti.

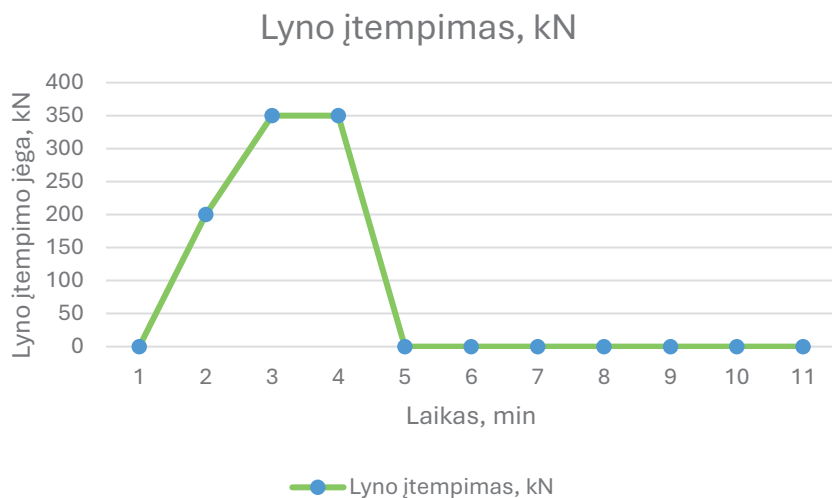


4.3 pav. Duomenų fiksavimas vilkikui vykdant LNG laivo „Arctic Voyager“ prišvartavimo operaciją (2022-10-08). Pateiktas vaizdas iš vilkiko (KLASCO 1) kapitono tiltelio (kairėje) ir vilkikų išsidėstymo schema (MarineTraffic n. d.)

Fig. 4.3. Data recording for the tugboat during the mooring operation of the LNG ship Arctic Voyager (2022-10-08) view from the bridge of the tugboat captain on the left pic. and diagrama of towing scheme in right (MarineTraffic n. d.)

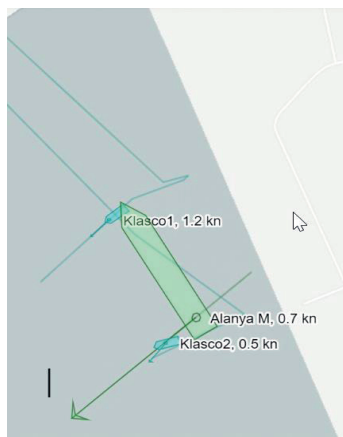
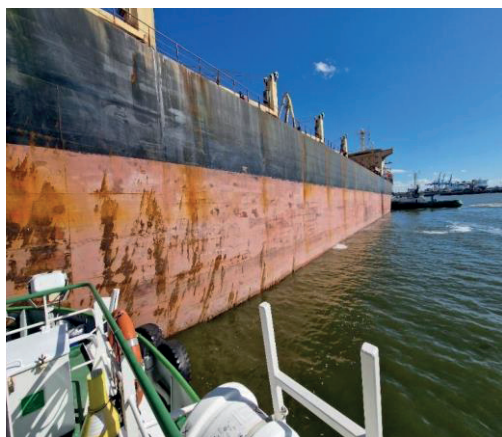
4.5 paveiksle vilkikas veikia traukimo-stūmimo režimu, duomenys fiksuoti iš vilkiko, kuris prisikabinęs iš laivo priekio. Šiuo atveju laivas atšvartuojamas nuo krantinės vilkikams veikiant iš šono. Tokiomis sąlygomis atliekant matavimus siekta šių tikslų: įvertintas vilkimo schemas efektyvumas ir surinkta informacija apie naudotą vilkiko galią bei lyno įtempimą, siekiant saugiai įvykdyti atšvartavimo operaciją tos dienos meteorologinėmis sąlygomis.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą



4.4 pav. Lyno įtempimo jėgos pasiskirstymas vykdant vilkimo operaciją, vilkikui veikiant laivagalyje

Fig. 4.4. Distribution of the towing line tension force during the towing operation when the tug is operating from the stern

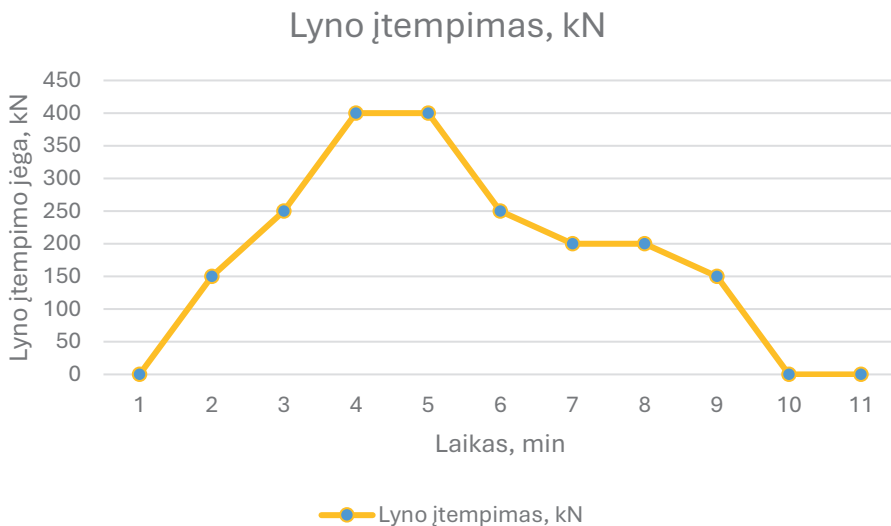


4.5 pav. Duomenų fiksavimas vilkikui vykdant sausakrūvio laivo „Alanya M“ prišvartavimo operaciją (2022-09-04). Vaizdas – iš vilkiko (KLASCO 3) kapitono tiltelio (kairėje) ir vilkikų išsidėstymo schema (MarineTraffic n. d.)

Fig. 4.5. Data recording for the tugboat during the mooring operation of the bulk carrier ship Alanya M (2022-09-04) view from the bridge of the tugboat captain on the left pic. and diagrama of towing scheme in right (MarineTraffic n. d.)

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Biriųjų krovinių laivo „Alanya M“ vilkimo operacijoje panaudoti du vilkikai prie kairiojo aptarnaujamo laivo borto, abu veikiantys traukimo-stūmimo režimu. Operacijos parametrai fiksuoti iš laivapriekyje veikiančio vilkiko. Vilkikų išsidėstymo schema ir judėjimo vektoriai – iš „Marine Traffic“ duomenų bazės. Vykdamt biriųjų krovinių laivo „Alanya M“ vilkimo operaciją pasiekta maksimali lyno įtempimo jėga – 400 kN. Lyno įtempimo grafikas vykdant operaciją pateiktas 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Lyno įtempimo jėgos pasiskirstymas vykdant vilkimo operaciją, vilkikai veikiant traukimo-stūmimo režimu aptarnaujamo laivo kairiojo borto priekyje

Fig. 4.6. Distribution of the towing line tension force during the towing operation when the tug is operating push-pull mode from the bow

Du vilkikai veikė traukimo-stūmimo režimu, padėdami laivui atsišvartuoti nuo krantinės, suteikti jam greičio ir ištempti jį į laivybos kanalą, kad savarankiškai galėtų manevruoti ir palikti uosto akvatoriją. Baigus atšvartavimo manevrą vilkikai atkabina lynus ir laivo nebelydi.

Skaičiuojant vektoriniu metodu sudarytu matematiniu modeliu, vertinant lyno įtempimą, atsižvelgta į realius vykdant tyrimo eksperimentą surinktus duomenis. Matematinis modelis perkeltas į *Matlab* programą ir keičiant parametrus nustatyta lyno tempimo jėga. Atliekami skaičiavimai leidžia siekti navigacinio laivybos saugumo, nes vykdant vilkimo operacijas lynu perduodama vilkiko sukuriama traukos dinaminė jėga, kurią būtina įvertinti, kad lynas nebūtų pertempiamas, nes nutrūkęs jis gali apgadinti įrangą ar sukelti didesnio masto nelaimes – apgadinti laivą ar sužaloti

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

žmones. Laivams manevruojant įvertinamas vilkimo sistemos (šiuo atveju vilkiko ir laivo) kampinis greitis, poslinkis ir posūkio kampas, tai svarbūs laivo manevravimo parametrai, kuriuos tiriant ir stebint jų pokyčius galima toliau vertinti lyno įtempimo, kuriuo laivui perduodama vilkiko sukuriama jėga, bandant ją išjudinti iš rimties taško, t. y. atšvartuoti nuo krantinės arba suteikti jam judesį – padėti apsisukti, parametrus. Šio tyrimo įvesties parametrai pateikti 4.2 lentelėje, rezultatai, siekiant juos palyginti, – 4.3 lentelėje ir grafikų pavidalu (žr. 4.7–4.9 pav.).

4.2 lentelė. Vektorinio metodo įvesties parametrai

Table 4.2. Vector method inputs

| | |
|--|---|
| Išorinė žadinančioji jėga $F_m = 300\,000\text{ N}$ | Kintamasis dydis, parenkamas pagal situaciją ir modeliuojamų vilkikų galingumą |
| Bangų dažnis $f = 0,2$ | Kintamasis dydis, parenkamas pagal situaciją arba atsižvelgiant į uosto sąlygas |
| $L_0 = 450\text{ m}$ | Kintamasis dydis – ilgis tarp galinio ir priekinio vilkiko centrų |
| $g = 9,81\text{ mm/s}^2$ | Gravitacijos jėga |
| Laivo 1 duomenys | |
| $m_1 = 141\,745\,000\text{ k}$ | Pasirenkama masė (priklauso nuo laivo) |
| $a_1 = 183\text{ m}$ | Atstumas nuo velkamo laivo centro iki laivagalio |
| $a_2 = 183\text{ m}$ | Atstumas nuo velkamo laivo centro iki laivapriekio |
| $J_1 = 1/12(m_1(a_1 + a_2)^2)$ | Inercijos momentas |
| $b_1 = 20\text{ m}$ | Atstumas nuo laivo inercijos polio iki antstato viršaus |
| Laivo 2 duomenys | |
| $m_2 = 293\,000\text{ kg}$ | Pasirenkama masė (priklauso nuo laivo) |
| $a_4 = 13\text{ m}$ | Atstumas nuo laivo masės centro iki lyno tvirtinimo vietos |
| $J_3 = 1/12(m_3(a_3 + a_4)^2)$ | Inercijos momentas |
| Lynų duomenys | |
| $L_1 = 50\text{ m}$ | Pirmojo vilkimo lyno ilgis |
| $L_2 = 50\text{ m}$ | Antrojo vilkimo lyno ilgis |
| $D_1 = 0,05\text{ m}$ | Vilkimo lyno skersmuo |
| $D_1 = D_2$ | Abu naudojami vilkimo lynai vienodo skersmens |

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

| | |
|------------------------------------|--|
| $S_1 = \pi \cdot (D_1^2)/4$ | Vilkimo lyno skerspjūvio plotis |
| $S_1 = S_2S$ | Abiejų vilkimo lynų skerspjūvis vienodas |
| $E = 200^9$ | Elastingumo koeficientas |
| Lyno slopinimo koeficientas | |
| $C_{12} = 5000$ | Pirmojo lyno slopinimo koeficientas – iš gamintojo techninių charakteristikų |
| $C_{13} = 5000$ | Antrojo lyno slopinimo koeficientas – iš gamintojo techninių charakteristikų |
| Lyno standumo koeficientai | |
| $k_{12} = S_1 \cdot E/L_1$ | Pirmojo vilkimo lyno standumo koeficientai apskaičiuojami, remiantis turimais duomenimis |
| $k_{13} = S_2 \cdot E/L_2$ | Antrojo vilkimo lyno standumo koeficientai apskaičiuojami, remiantis turimais duomenimis |

4.3 lentelė. Vektorinio skaičiavimo rezultatų palyginimas su realiais eksperimentiniais vilkiko darbo rezultatais

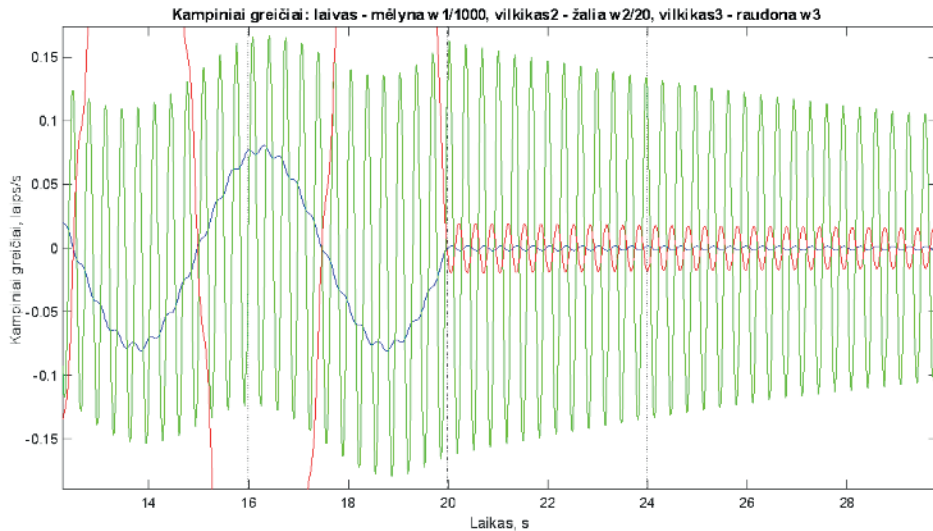
Table 4.3. Vector method calculation result comparing with experimental results

| Bandymo nr. | Variklio galia | Lyno įtempimas vykdant vilkimo operaciją | Vektorinio metodo taikymo rezultatai | Kalibravimo koeficientas R_n |
|-------------|----------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 70 % | 45 T | 43 T | 1,05 |
| 2 | 30 % | 30 T | 33 T | 0,91 |
| 3 | 50 % | 40 T | 44 T | 0,91 |
| 4 | 50 % | 40 T | 37 T | 1,08 |
| 5 | 70 % | 45 T | 43 T | 1,05 |
| 6 | 30 % | 50 T | 54 T | 0,93 |
| 7 | 50 % | 45 T | 43 T | 1,05 |
| 8 | 70 % | 50 T | 50 T | 1 |
| 9 | 70 % | 45 T | 47 T | 0,96 |
| 10 | 50 % | 40 T | 42 T | 0,95 |

Prie vilkimo sistemos trečiojo nario (vilkiko) pridėjus išorinį poveikį – periodinę poveikio jėgą vertikalia ašimi, nustatyta, kad tas poveikis labiausiai veikia būtent tą vilkiką, o dėl pagrindinio laivo didelės masės ir inercijos kitų dviejų laivų poslinkiai ir posūkiai bei jų greičiai santykinai daug mažesni. Akivaizdūs tik nedideli antrojo vilkiko ir pagrindinio laivo poslinkiai bei svyravimai, be to, vilkikui judant išryškėja

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

ir aukštesnioji harmonika, t. y. laivo virpinimas tampant lyną tarp antrojo vilkiko ir pagrindinio laivo. Kampinio greičio pokyčio grafikas pateiktas 4.7 paveiksle (vilkimo lyno įtempimai).



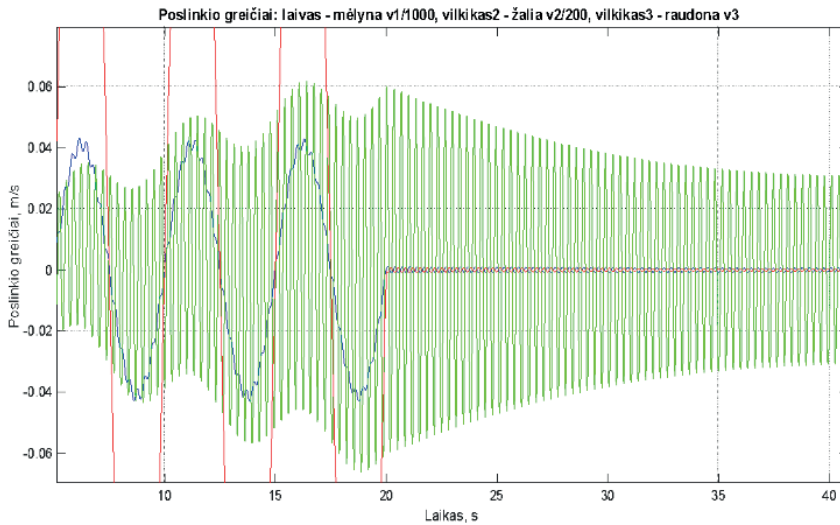
4.7 pav. Vilkimo sistemos su dviem vilkikais ir konteineriniu laivu kampinio greičio pokyčio grafikas (Matlab programa)

Fig. 4.7. Towing system with two tugs and container vessel angular speed change graphic

Prie vilkikų pridėjus jėgą, vilkimo sistemos grafikas rodo, kad velkamo laivo poslinkiai dėl jo didelės masės per matuotą laiką yra nedideli. Vilkikų ir laivo poslinkio fazės nesutampa dėl didelės velkamo laivo masės ir inercijos momento, siekiant vilkimo sistemai suteikti poslinkį. Vilkimo sistemos grafike (žr. 4.8 pav.) pateiktas sužadintos vilkimo sistemos poslinkių pasiskirstymas vykdant operaciją. Sistemą sugrąžinus į ramybės būseną, pašalinus ją žadinančias jėgas, matome, kad ji yra stabili.

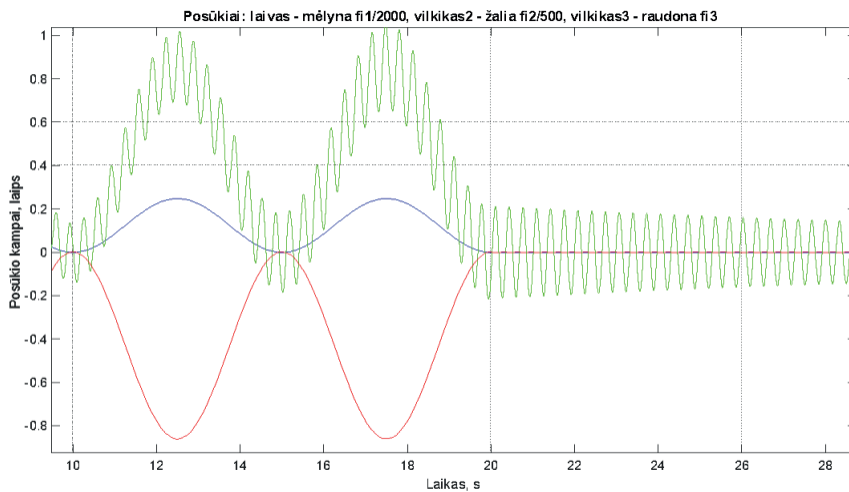
Panaikinus išorines jėgas, slopstantys posūkių švytavimai nedideli, o jų fazės skirtingos, bet ne priešingos. Sistemos posūkio grafike (4.9 pav.) matome, kad pašalinus žadinančias jėgas posūkis slopsta ir vilkimo sistema sugrįžta į ramybės būseną, taigi ji yra stabili, kaip parodyta grafikuose (4.7–4.9).

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.8 pav. Vilkimo sistemos su dviem vilkikais ir konteineriniu laivu poslinkio pokyčio grafikas (Matlab programa)

Fig. 4.8. Towing system with two tugs and container vessel displacement change graphic



4.9 pav. Vilkimo sistemos su dviem vilkikais ir konteineriniu laivu posūkio pokyčio grafikas (Matlab programa)

Fig. 4.9. Towing system with two tugs and container vessel turning change graphic

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Grafikai gauti suvedus duomenis į *Matlab* programą ir joje suprogramavus lygčių sistemas (formule 2.45–2.48), atitinkamus kintamuosius pasitelkus iš realių situacijų (lyno įtempimas, laivų svoriai, vilkimo jėgos ir t. t.). Siekta gauti rezultatus, kurie būtų kuo artimesni realiams. Šio skaičiavimo ir modeliavimo metodo apribojimai – sistemą sudaro velkamas laivas ir du arba vienas vilkikas. Šiuo metodu labiausiai tinka apskaičiuoti parametrus, kai visa sistema pajuda iš statinės būsenos, tai būdinga atsišvartavimo operacijoms, kai aptarnaujamo laivo greitis lygus 0.

Pateikti grafikai ir rezultatai akivaizdžiai rodo, kad norint pakeisti aptarnaujamo velkamo masyvaus konteinerinio laivo greitį ir trajektoriją reikia labai didelių išorinių jėgų, kurias ir sukuria vilkikai. Siekiant užtikrinti laivo atliekamo manevro saugumą, šias operacijas gali vykdyti tik kompetentingi vilkiko įgulos nariai, atitinkamai pasirengusi turi būti ir uosto direkcija. Taigi vektorinis metodas yra universalus ir gali būti pritaikytas vykdant daugelį standartinių vilkikų operacijų uoste, tokių kaip laivų atšvartavimas arba prišvartavimas prie krantinių, judėjimas laivybos kanalu užduota trajektorija ir posūkiai.

Taikant maksimalaus paskirstymo metodą apskaičiuoti rezultatų gavimo tikslumo juosta. Gautus lyno įtempimo rezultatus palyginus su eksperimentinio tyrimo rezultatais, išvestas kalibravimo koeficientas, kuris naudotas siekiant palyginti vykdant eksperimentą, matematinį modeliavimą ir simuliacinius tyrimus gautus rezultatus.

4.2. Simuliacinio tyrimo rezultatai

Vertinant disertacijos autoriaus sukurtą vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos metodiką bei jos taikymo uoste galimybes, atlikti tyrimai su realiais laivais ir kalibruotu simulatoriumi. Simuliacinio tyrimo tikslas – atkartoti praktiniame eksperimente su vilkikais atliktus bandymus, siekiant patikslinti rezultatus: kadangi praktinių tyrimų skaičius yra ribotas, būtent simulatoriuje galima įvertinti vilkimo schemų efektyvumą jį sukalibravus pagal realiomis sąlygomis gautus skaičius. Tyrimų rezultatai aptariami šiame poskyryje.

Atlikus simuliacinius tyrimus nustatyta, kad jų rezultatai priimtiniu tikslumu atitinka realių eksperimentų rezultatus ir teorinius skaičiavimus (10 %) praktiniams uždaviniams spręsti.

Tiriant vilkikų darbą uoste disertacijoje plačiau nagrinėjamas išorinių veiksnių (vėjo, srovės, seklos) poveikis vilkimo operacijai, esant sudėtingoms ir ribinėms darbo uoste sąlygoms. Apibendrintiems tyrimams parinktas laivas ($L = 238$ m), kurio parametrai pateikti 3.4 lentelėje. Palyginamasis tyrimas atliktas remiantis tyrimo realiuose vilkikuose rezultatais.

Gauti duomenų palyginamieji rezultatai pateikti 4.4 lentelėje, jais remtasi kalibruojant simulatorių taikant teorinius metodus. Šioje lentelėje pateikti ir palyginamieji tyrimų rezultatai.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

4.4 lentelė. Vilkimo lyno įtempimo jėgų (tonomis) eksperimentinio ir simuliacinio tyrimų palyginamieji rezultatai

Table 4.4. Comparative results of the experimental and simulation study of towing line tension forces (tons of forces)

| Bandymo nr. | Vėjo greitis | Vėjo kryptis | Realiame vilkike vykdančią operaciją fiksuotas lyno įtempimas | Simuliaciniame fiksuotas lyno įtempimas | Kalibravimo koeficientai |
|-------------|--------------|--------------|---|---|--------------------------|
| 1 | 8 m/s | 335 (ŠV) | 45 T | 43 T (430 kN) | 1,05 |
| 2 | 6 m/s | 335 (ŠV) | 35 T | 30 T (300 kN) | 1,16 |
| 3 | 5 m/s | 335 (ŠV) | 40 T | 40 T (400 kN) | 1 |
| 4 | 5 m/s | 270 (V) | 40 T | 41 T (410 kN) | 0,98 |
| 5 | 8 m/s | 335 (ŠV) | 45 T | 43 T (430 kN) | 1,05 |
| 6 | 10 m/s | 270 (V) | 50 T | 48 T (480 kN) | 1,04 |
| 7 | 10 m/s | 335 (ŠV) | 45 T | 46 T (460 kN) | 0,98 |
| 8 | 12 m/s | 360 (Š) | 50 T | 52 T (520 kN) | 0,96 |
| 9 | 12 m/s | 360 (Š) | 45 T | 45 T (450 kN) | 1 |
| 10 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 41 T (410 kN) | 0,98 |
| 11 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 42 T (420 kN) | 0,95 |
| 12 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 42 T (420 kN) | 0,95 |
| 13 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 40 T (400 kN) | 1 |
| 14 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 39 T (390 kN) | 1,02 |
| 15 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 41 T (410 kN) | 0,98 |
| 16 | 9 m/s | 135 (PR) | 40 T | 40 T (400 kN) | 1 |

Pagal formulę (2.50), kai vėjo greitis – 9 m/s ir kryptis į krantinę 135 laipsniai, įvertinamas skaičiavimo tikslumas priimant 95 % tikimybę:

$$F'_v = 40,7 \pm 2 \times 0,37 \times 3 = 40,7 \pm 2,2 (T).$$

Pagal (2.52) formulę įvertinamas skaičiavimo tikslumas esant panašioms sąlygoms, kai vėjo greitis – 9 m/s:

$$F'_v = 40,7 \pm 3 (T).$$

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą

Gauti vilkikų traukos jėgos tyrimų rezultatai ir jų palyginimas sudarė galutinio matematinio modelio (2.43), kuris paremtas atliktų tyrimų rezultatais, leidžiančiais veiksmingai įvertinti būtiną vilkikų traukimo jėgą esant skirtingoms meteorologinėms sąlygoms, rengimo prielaidas.

Vykdamas simuliacinį tyrimą suvesti rezultatai naudojami kaip kalibravimo priemonė, siekiant kuo tiksliau atkurti realią situaciją ją simuliuojant treniruoklyje. Simulatorius taiko jau suvestus matematinius modelius, bet keičiantis konkrečioms realioms vilkimo operacijų parametrų matematinius modelius galima tobulinti, kad jie kuo tiksliau atitiktų realias situacijas. Kitu atveju kalibravimas taikomas kaip patikslinimo priemonė, siekiant patikrinti, kaip konkrečiai situacijai parengtas simulatorius atitinka realius veiksmus.

Uosto krantinės nr. 127 ilgis – 265 m, gylis ties krantine siekia 10 m, vidutinis gylis įlankoje – 14 m. Tirti pasirinktas laivas, kurio pagrindiniai duomenys yra: ilgis tarp statmenų – 238 m, plotis – 32,3 m, grimzlė – 9,2 m, tonažas – 64 500 T, vairo plokštės plotas į diametraliąją plokštumą – 36 m²; laivo viršvandeninės dalies projekcijos plotas į diametraliąją (vidurinę) plokštumą – 7200 m²; laivo viršvandeninės dalies projekcijos plotas į midelio plokštumą – 950 m²; laivo povandeninės dalies projekcijos į diametraliąją plokštumą plotas – 2190 m²; laivo laivapriekio grimzlė – 9,1 m; laivo laivagalio grimzlė – 9,3 m; priimtas vandens tankis – 1000 kg/m³. Laivui atšvartuoti ir manevruoti naudoti 1–3 ASD tipo vilkikai, kurių kiekvieno trauka – iki 500 kN (vilkiuko ilgis – 29,44 m, plotis – 10,1 m, grimzlė – 4,6 m, variklio galingumas – 3370 kW).

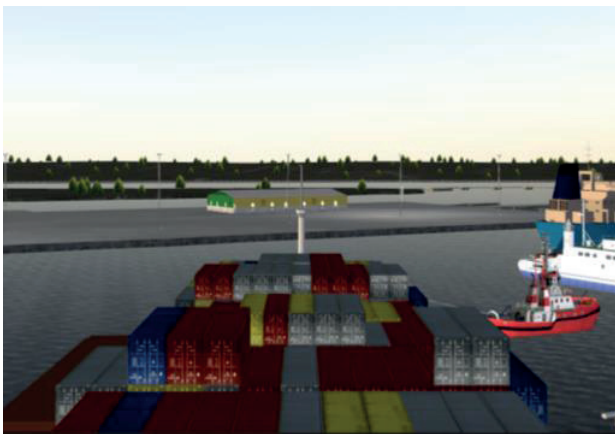


4.10 pav. Navigacinė situacija prie krantinės nr. 127

Fig. 4.10. Navigation situation on berth No. 127

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Atsižvelgiant į vietovės sąlygas, vilkikai veikė vilkimo ir traukimo-stūmimo režimu. Šalia kitų krantinių, išplaukiant iš manevravimo zonos (įlankos), prie artimiausios krantinės buvo prisišvartuotas POST PANAMAX krovininis laivas (sausakrūvis) ir keltas (4.11 pav.).



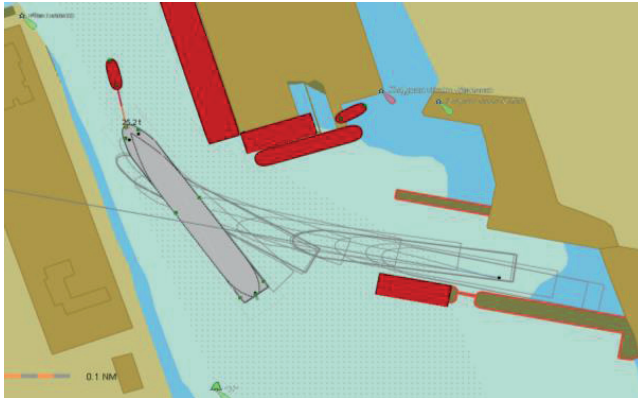
4.11 pav. Situacijos vizualizavimas prieš pradėdant atšvartavimo operaciją

Fig 4.11. Situation visualization before unmooring

Skaičiuojant atsižvelgta į krantinės atmušų charakteristikas ir vietos reikalavimus. Pasirinktos tokios sąlygos: nėra bangavimo ir srovės, vėjo greitis – iki 14 m/s, skirtingos vėjo kryptys, nenaudojami velkamo laivo pavairavimo mechanizmai, nors laivo greitis labai mažas. Remiantis bandymų, atliktų realiame laive, rezultatais, atsižvelgus į minėtas charakteristikas ir esamas sąlygas, taikant kalibravimo koeficientus koreguotos (2.32)–(2.34) lygtys bei simulatoriumi gauti rezultatai. Taikant aprašytą metodiką ir skaičiavimus, 4.11 paveiksle pateikta posūkio ir išplaukimo iš įlankos trajektorija.

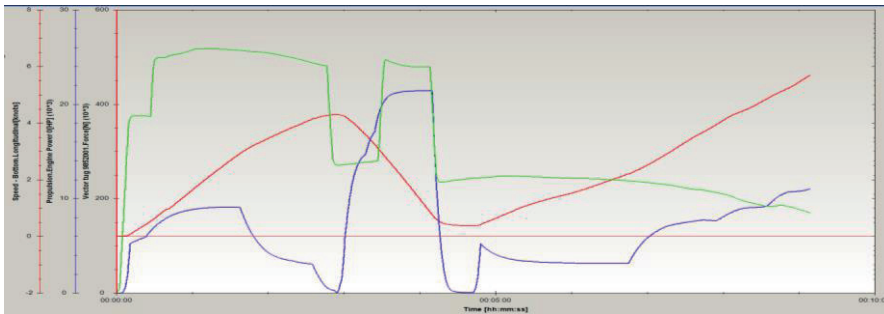
Pateikti laivo parametrai atskleidžia vilkikų poreikį vykdant vilkimo operaciją. Veikiant vienam vilkikui, kuris padeda laivui ($L = 238$ m) atsišvartuoti pučiant 14 m/s šiaurės krypties vėjui, jo lyno įtempimas (vilkimo jėga) yra arti maksimalios reikšmės nuo operacijos pradžios iki tada, kol laivas įgauna greitį ir pats savarankiškai gali pradėti manevruoti bei plaukti uosto kanalu. Laivo greitis operacijos pradžioje jo manevringumo beveik neveikė, bet laipsniškai didėjo, o pagrindinį darbą laivui padedant manevruoti, kontroliuojant jo padėtį jam tolstant nuo krantinės iki to momento, kai jis pradėjo manevruoti savarankiškai, atliko vilkikas.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.12 pav. Laivo atsišvartavimo trajektorija naudojant vieną vilkiką, kurio traukos jėga – 500 kN (vėjo kryptis N – 14 m/s)

Fig. 4.12. Trajectory of the ship during mooring when one tug is used with a pulling force of 500 kN (wind direction N – 14 m/s)



4.13 pav. Laivo parametrai jam atsišvartuojant: laivo greitis (raudona kreivė), variklio galia (mėlyna kreivė), vilkiko lyno tamprumas (žalia linija) (vėjas N – 14 m/s)

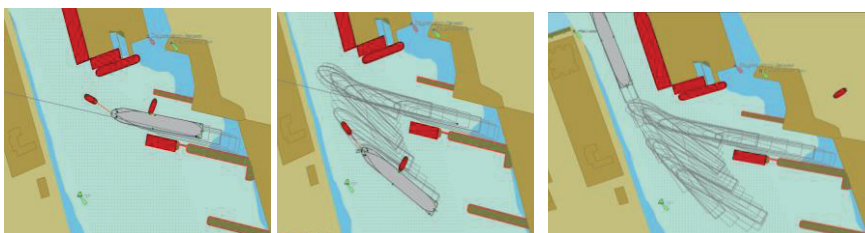
Fig. 4.13. Ship parameters during mooring: Ship speed (red curve), engine power (blue curve) tug towing line elasticity (green line) (wind N – 14 m/s)

Šiuo atveju vilkikas, padedantis laivui atsišvartuoti nuo krantinės ir įgauti greitį, kol savarankiškai galės manevruoti uosto kanale, veikė 90–100 % galimo savo apkrovimo. Tokiose situacijose, nors skaičiavimai ir vykdytos simuliacijos rodo, kad operacija sėkminga, visgi reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad vilkikui veikiant ties maksimalių galimybių riba gali pasitaikyti techninių ar žmogiškų klaidų, kurios lemia vilkimo operacijos komplikacijas. Panašiomis realiomis laivo eksploatavimo sąlygomis

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

naudojami du vilkikai, kai didžiausia jų abiejų naudojama vilkimo jėga – ne didesnė kaip 450 kN (vykdydami atšvartavimo ir manevravimo operacijas vilkikai naudoja iki 50 % traukos jėgos).

4.14 paveiksle pateikta laivo trajektorija, 4.15 paveiksle – vilkikų darbo parametrai laivui atsišvartuojant, jį pasukant ir išplaukiant iš įlankos, kai dirba du vilkikai.



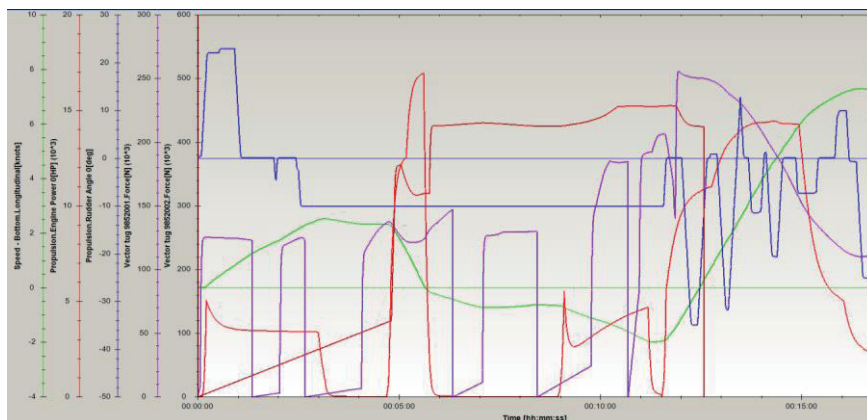
4.14 pav. Laivo ($L = 238$ m) atšvartavimas nuo krantinės, kai vėjas $W = 14$ m/s, padedant dviem vilkikams (abiejų traukos jėga – po 500 kN): vienas tempia laivą iš priekio, antrasis veikia prie dešinio borto traukimo-stūmimo režimu)

Fig. 4.14. Mooring of a ship ($L = 238$ m) from the quay in a wind of $W = 14$ m/s with the help of two tugs (both pulling power 500 kN each) – one pulls the ship from the front, the second works on the starboard side in push/pull mode)

Laivo ($L = 238$ m) atsišvartavimo ir judėjimo trajektorija bei vilkikų veiksmi vykdam šią operaciją, kai vėjas $W = 14$ m/s, atskleidžia, kad operacija, įvertinus meteorologines sąlygas, atlikta sklandžiai. Laivo ir vilkikų išsidėstymo schema bei laivo judėjimo trajektorija jam atsišvartuojant, pučiant vėjui $W = 14$ m/s, iki momento, kai antrasis vilkikas užbaigs traukimo-stūmimo operaciją, atskleidžia, kad šiuo atveju dviejų vilkikų schema, kai vienas vilkikas naudoja vilkimo lyną (velkamo laivo priekyje), o antrasis veikia traukimo-stūmimo režimu, yra efektyvi.

Pateikti vilkikų darbo ir laivo judėjimo bei valdymo parametrai vykdam šią operaciją atskleidžia vilkikų darbo ypatumus, kai laivo greitis operacijos pradžioje didelio poveikio jo manevringumui nedarė, pagrindinį darbą laivui padedant manevruoti atliko vilkikai, kontroliavę padėtį jam tolstant nuo krantinės, kol jis pradės manevruoti savarankiškai laipsniškai didindamas greitį ir vilkimo jėga jam išplaukiant iš įlankos nebeveiks, taip užbaigiant vilkimo operaciją. Atlikus skaičiavimus, kai pučia vakarų vėjas, kurio greitis – 14 m/s, paaiškėjo, kad norint išlaikyti laivą posūkyje būtina ne mažesnė kaip 750 kN traukimo jėga, nes laivas turi pasisukti ir judėti atgal, kad galėtų įgyti pakankamą greitį iš įlankos plaukiant navigaciniu kanalu.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą



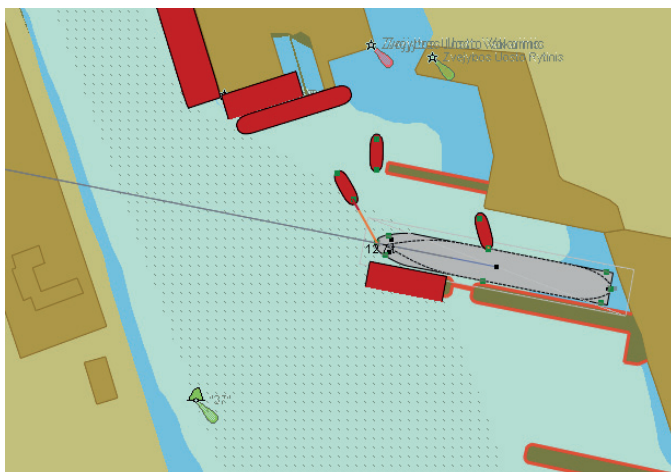
4.15 pav. Laivo greitis (žalia linija), variklio galia (oranžinė linija), vairo pasukimo kampas (mėlyna linija), pirmojo vilkiko lyno įtempimas (violetinė linija), antrojo vilkiko traukimo-stūmimo jėga (raudona linija), vykdant laivo atšvartavimą ir manevravimą įlankoje prieš išplaukiant į laivybos kanalą, kai vėjas $W = 14$ m/s

Fig. 4.15. Ship speed (green line), engine power (orange line), rudder angle (blue line), towing line tension of the first tug (purple line) push/pull power of the second tug (red line) during berthing and maneuvering of the vessel in the bay before sailing to shipping channel with wind $W = 14$ m/s

4.16 paveiksle pavaizduota vilkikų vieta pirmojo atšvartavimo etape, vertinant trijų vilkikų darbą.

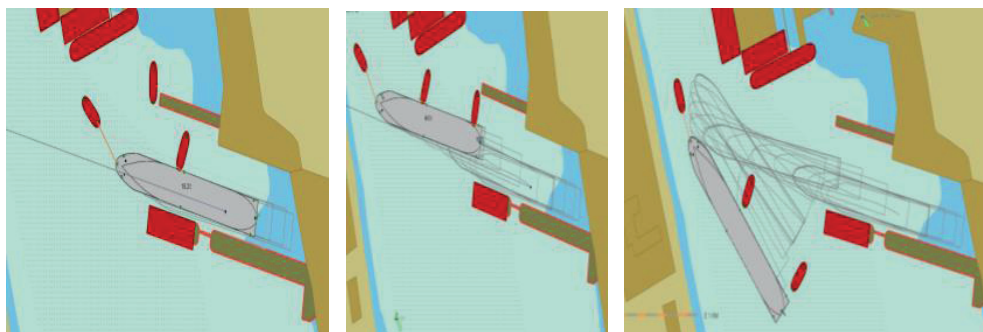
Laivo padėtis pradėjus atšvartavimo operaciją parodyta 4.17 paveiksle. Operacijos pradžioje vilkikai išsidėstę tokia tvarka: laivo priekyje esantis vilkikas traukia laivą vilkimo lynu, vilkikas ties laivo viduriu (laivo stūmimas prieš laivo dreifo kryptį) ir papildomas vilkikas (nr. 3) turi būti pasirengę pradėti traukimo-stūmimo operaciją, laivagaliui priartėjus prie krantinės.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.16 pav. Laivo ($L = 238$ m) atsišvartavimas nuo krantinės esant 14 m/s pietų krypties vėjui, operacijoje dalyvaujant trims vilkikams (vilkikų traukos jėga -500 kN): pirmasis užėmęs traukimo padėtį, antrasis – ties laivo viduriu veikia traukimo-stūmimo, trečiasis – laukimo režimu

Fig. 4.16. The operation of mooring a ship ($L = 238$ m) from the quay in a southerly wind of 14 m/s, when three tugboats are involved in the operation (pulling power of the tugboats is 500 kN). The first in towing position, the second in push/pull amidships, and the third in standby mode

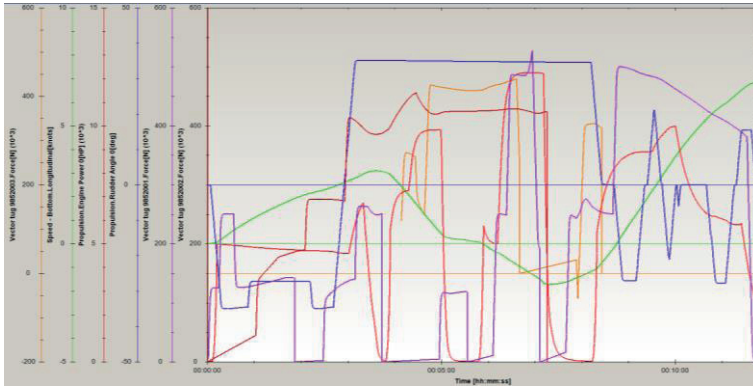


4.17 pav. Laivas ($L = 238$ m) pučiant 14 m/s pietų krypties vėjui pradeda judėti nuo krantinės, pasitelkus tris vilkikus: vienas užėmęs vilkimo padėtį, kitas dirba traukimo-stūmimo režimu, trečias – budėjimo padėtyje

Fig. 4.17. Vessel ($L = 238$ m) start unmooring from berth when wind speed is 14 m/s and direction is from south when used 3 tug for operation like this: first from bow, second from portside working push-pull mode, third one stand by mode

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Situacija, kai laivas ($L = 238$ m) pučiant 14 m/s pietų vėjui pradeda judėti nuo krantinės padedant trims vilkikams, yra tokia: vienas vilkikas vykdo vilkimą, kiti du veikia traukimo-stūmimo režimu.



4.18 pav. Laivo greitis (žalia linija), laivo variklio galia (oranžinė linija), laivo vairo pasukimo kampas (mėlyna linija), pirmojo vilkiko vilkimo lyno įtempimo jėga (violetinė linija), antrojo vilkiko stūmimo jėga (oranžinė linija) ir trečiojo vilkiko stūmimo jėga (geltona linija) laivui atsišvartuojant, manevruojant ir išplaukiant į uosto laivybos kanalą pučiant 14 m/s pietų krypties vėjui

Fig. 4.18. Vessel speed (green line), vessel engine power (orange line), vessel rudder angle (blue line), tugboat 1 towline tension force (purple line), tugboat 2 pushing force (orange line) and tugboat 3 pushing force (yellow line) during the ship's mooring, maneuvering and departure from the bay in the presence of a southerly wind of 14 m/s

Pučiant pietų krypties vėjui atšvartuoti laivą sudėtingiau, nes dėl nedidelio atstumo tarp jo ir krantinės nr. 125 neįmanoma laivo laivagalyje turėti vilkiko, kuris stumtų laivą prieš jo dreifą šiaurės kryptimi. Taikant disertacijoje pateiktą metodiką, apskaičiuavus aerodinamines jėgas, nustatytas trijų vilkikų, kurių bendra traukos (stūmimo) jėga turėtų būti iki 1300 kN, poreikis. Pirmajame atšvartavimo darbų etape nėra galimybės naudoti trijų vilkikų, laivo priekyje gali būti tik vienas vilkikas, velkantis vilkimo lynu, kitas traukimą-stūmimą vykdomas vilkikas – laivo viduryje. Laivui įlankoje vykdomas posūkio manevras, kai pučia pietų krypties vėjas, taikant traukimo-stūmimo metodą, abu vilkikai (viduryje ir laivagalyje) naudoja 100 % savo galios. Paprastai panašiomis realiomis laivo eksploatacijos sąlygomis naudojami trys vilkikai, kurių traukimo jėga kartu siekia iki 1200–1300 kN (vilkikai naudoja 70–100 % savo traukimo-stūmimo galios, vykdydami atšvartavimo ir laivo manevravimo operacijas, ypač jam sukantis įlankoje).

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

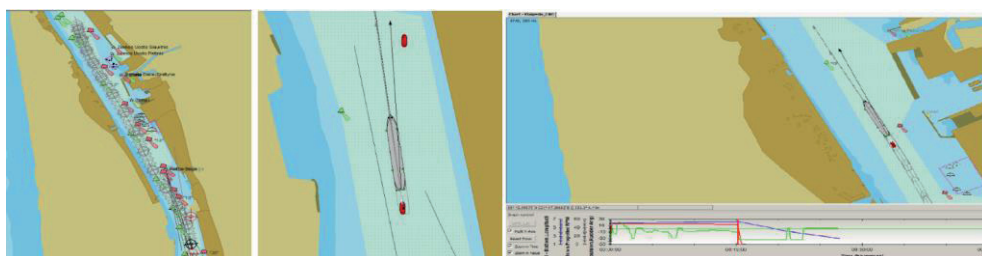
Siekiant patikrinti vilkikų poveikį laivų navigaciniam saugumui vykdytas tyrimas atkartojant realų įvykį uoste, tai yra laivo užplaukimą ant seklumos. Minimas incidentas Klaipėdos uoste įvyko 2015-07-22: užgeso laivo „Efi Theo“ pagrindinis variklis, jam plaukiant iš Biriųjų krovinių terminalo. Nevaldomas laivas užplaukė ant laivakelio šlaito. Užplaukimas ant uosto vidinio navigacinio kanalo šlaito dėl laive įvykusio elektros energijos tiekimo (angl. *black out*) sumodeliuotas kalibruotame „SimFlex Navigator“ simuliatoriuje. Šio eksperimento tikslas – dar vienas išplėstinis metodologinių nurodymų pritaikymas, leidžiantis išvengti laivų incidentų ir nelaimių uoste ne tik laivus prišvartuojant ir atšvartuojant, bet ir jiems plaukiant laivybos kanalais. Vis daugiau uostų taiko praktiką, kai vilkikai ne tik padeda laivams uostuose prisišvartuoti ir atsišvartuoti, bet ir privalo lydėti laivus jiems plaukiant uostų kanalais, ypač tais, kurie strategiškai svarbūs. Šių taisyklių atsiradimą lėmė minėti incidentai Klaipėdos uoste arba 2.2–2.3 paveiksluose pateikti pavyzdžiai, kai dėl laivo variklio gedimo sutrikdytos tarptautinės tiekimo grandinės ar patirti didžiuliai materialiniai arba žmogiškieji nuostoliai. Eksperimento sąlygos pateiktos 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Meteorologinės sąlygos įvykio metu ir vykdant eksperimentą

4.5 table. Meteorological conditions

| Klirensas | Vėjo greitis | Vėjo kryptis | Srovė |
|-----------|--------------|--------------|----------------------|
| 2 m | 10 m/s | 269° | Iš uosto – 0,5 mazgo |

Realioje situacijoje jokia oro anomalija nefiksuota.



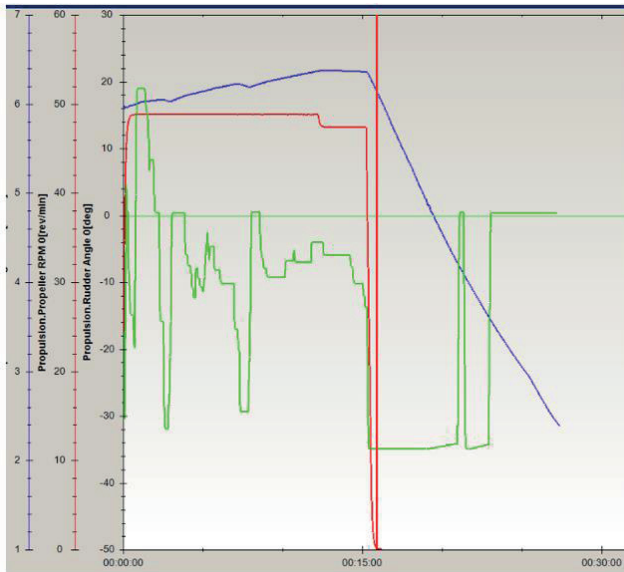
4.19 pav. Laivo judėjimo Klaipėdos uosto akvatorija trajektorija, vilkikui esant laivo gale

Fig. 4.19. Vessel drift trajectory in Klaipėda port while tug is connected from stern

Vykdamas eksperimentą simuliatoriuje sausakrūvis laivas juda Klaipėdos uosto kanalu kartu su vilkiku, kuris yra laivagalyje, 7 mazgų greičiu, kol sutrikus energijos tiekimui sustoja variklis ir laivas praranda valdymo kontrolę. Laivybos kanalu laivas plaukia vienas, prasilenkiančių ar manevruojančių laivų kelyje nefiksuojama.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

4.19 paveiksle (kairėje) pateikta laivo trajektorija uosto plaukimo kanale: viduryje – laivo judėjimas iš galo jį lydint vilkikui, susijungus vilkimo lynu, iki variklio gedimo situacijos, dešinėje – laivo trajektorija sugedus varikliui.

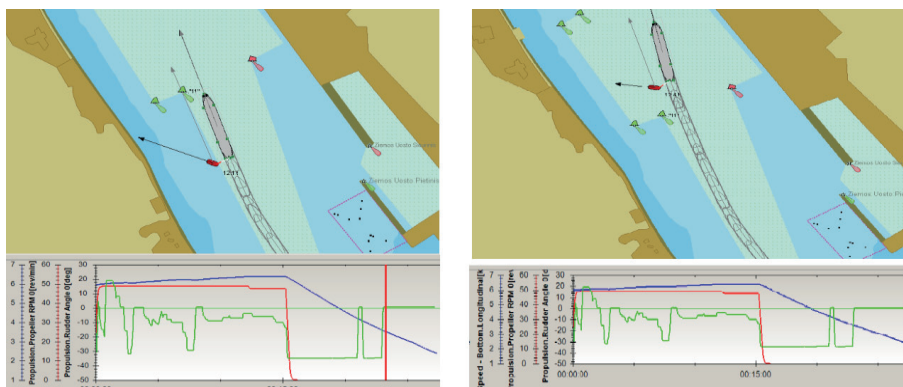


4.20 pav. Fiksuoti laivo judėjimo parametrai iki variklio gedimo (plaukta 30 min) ir varikliui sustojus (po 30-os minutės). Žalia linija – vairo plokštės pasukimo kampas, raudona – sraigto apsukos, mėlyna – laivo greitis

Fig. 4.20. The fixed parameters of the ship's movement until the engine stops (up to 30 min) and the fixed parameters of the ship after the engine stop are fixed after 30 min. The green line is the turning angle of the rudder, the red line is the propeller revolutions, the blue line is the ship's speed

Raudona grafiko linija rodo laivo variklio gedimo momentą, kai mažėjant laivo greičiui jis valdytas vien tik vairu, kol į operaciją įtrauktas vilkikas. 4.20 paveiksle pateikti laivo parametrai nuo variklio gedimo iki saugaus apsisukimo baseino pasiekimo momento. Vertikali raudona linija rodo operacijos pabaigą. Grafikas vaizduoja laivo parametrus: laivo greitį, sraigto apsukas, vairavimo plokštės kampą realiu laiku visos operacijos metu. Vykiant eksperimentą fiksuota, kad laivo manevravimo parametrai apima įvairius išorinius veiksnius, kurie daro poveikį laivo judėjimui ir gebėjimui vykdyti manevrus. Jie priklauso nuo laivo ir jo variklio tipo, laivo dydžio ir kitų charakteristikų. Kad būtų užtikrintas efektyvus ir saugus laivo manevravimas įvairiomis sąlygomis, parametrus būtina suderinti.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą



4.21 pav. Laivo ir vilkiko trajektorija laivui įplaukiant į apsisukimo baseiną (kairėje), į jį įplaukus ir saugiai užbaigus manevrą uoste be galimų incidentų (dešinėje)

Fig. 4.21. Trajectory of the ship and the tug when entering the turning basin (left graph), and after entering the turning basin and safely completing maneuvering in the port avoiding possible incidents (right graph)

Vykdam tyrimą vilkikas veikė 50–75 %, trumpomis laiko atkarpomis – ir 100 % pajėgumu. Tuo atveju, laivui plaukiant siaurais laivybos kanalais, tokie gedimai ypač pavojingi, būtina greita reakcija ir įgulos narių patirtis, kad neišplauktų už kanalo ribų ant seklumos ar neapgadintų krantinės. Kita pavojinga situacija susiklosto siauruose laivybos kanaluose laivams prasilenkiant nedideliu atstumu. Ir šiuo atveju incidentų tikimybė gedimo atveju gana didelė.

Laivo ir vilkiko padėties trajektorija rodo, kad vilkiko pasitelkimas lemia teigiamą rezultatą: galima suvaldyti laivą esant panašioms sąlygoms ir išvengti jo užplaukimo ant seklumos (4.21 pav., kairėje). Vilkiko padedamas laivas, vykdant eksperimentą, pasiekė uosto apsisukimo baseiną, kur gali saugiai inkaruotis laukdamas kitų vilkikų, kad šie nutemptų jį į remonto vietą ar priešvartuotų prie artimiausios laisvos krantinės. Taigi simuliatoriuje avarinė situacija suvaldyta ir laivas neužplaukė ant seklumos, išvengė susidūrimo su kitu laivu, atsitrenkimo į krantinę ar kitų netikėtų incidentų.

Šiuo atveju simuliacinių tyrimų rezultatai kuriant matematinį modelį svarbūs, nes suteikia vertingos vilkimo sistemos veikimo informacijos ir leidžia patikrinti modelio atitikimą realiai situacijai. Be to, šie tyrimai leidžia patikrinti, ar matematinis modelis tiksliai apibūdina realią sistemą. Šiuo atveju, jei simuliacinio tyrimo rezultatai atitinka eksperimento rezultatus, matematinis modelis yra tikslus ir gali būti validuotas. Taigi:

- simuliaciniai tyrimai leidžia koreguoti modelio parametrus taip, kad jie atitiktų realius tyrimo duomenis. Tai aktualu norint išbandyti skirtingas vilkimo schemas;

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

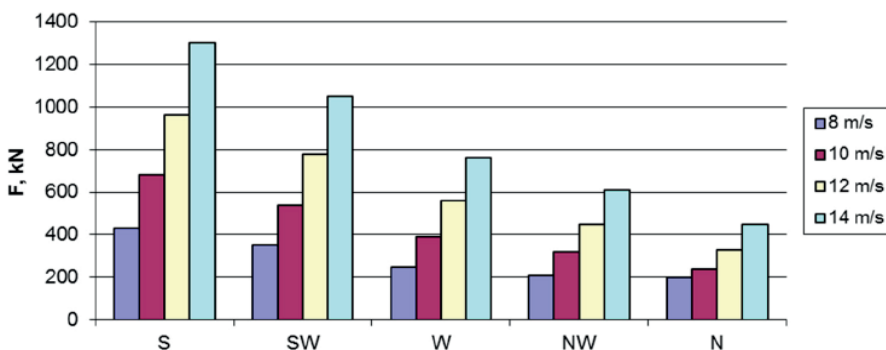
- simuliaciniai rezultatai dažnai atskleidžia matematinio modelio spragas. Remiantis vykdytos simuliacijos rezultatais, modelį galima koreguoti, papildyti naujais kintamaisiais ar funkcijomis, kad jis būtų artimesnis realiai sistemai.

Simuliaciniai tyrimai yra pagrindinis matematinių modelių kūrimo žingsnis, nes leidžia išbandyti modelio struktūrą, nustatyti jo ribotumą ir įvertinti prognozavimo įvairiomis sąlygomis tikslumą.

4.3. Eksperimentinių ir palyginamųjų tyrimo rezultatų apibendrinimas bei pritaikymas, siekiant užtikrinti uosto navigacinį saugumą

Susistemintus tyrimo duomenis galima suvesti į grafikus ir taip nustatyti skirtingo ilgio laivams (laivų ilgis priimtas kaip vienas iš veiksnių, į kuriuos paprastai atsižvelgiama užsakant uoste tam tikrą vilkikų skaičių) būtiną vilkikų traukimo jėgą, atsižvelgiant į vėjo ir srovės greitį bei kryptį.

Parinktam laivui ($L = 238$ m) vėjo sukuriamos jėgos (apskaičiuotos taikant disertacijos autoriaus sukurtą metodiką), atsižvelgiant į jo kryptį ir stiprumą, pateiktos grafikuose. Taikant sukurtą metodiką nustatoma būtina vilkikų traukos jėga ir jos pagrindu įvertinamas optimalus vilkikų skaičius (vertinamas kiekvienu individualiu atveju, neformalizuojamas) uosto sąlygomis laivui, kurio ilgis $L = 238$ m, išnagrinėjus situaciją konkrečioje uosto vietoje. Be to, nustatyta ir įvertinta nepalankiausia vėjo kryptis bei greitis, kai vilkimo operacijai būtina vilkimo jėga išauga. Gauti rezultatai pateikti 4.22 paveiksle.

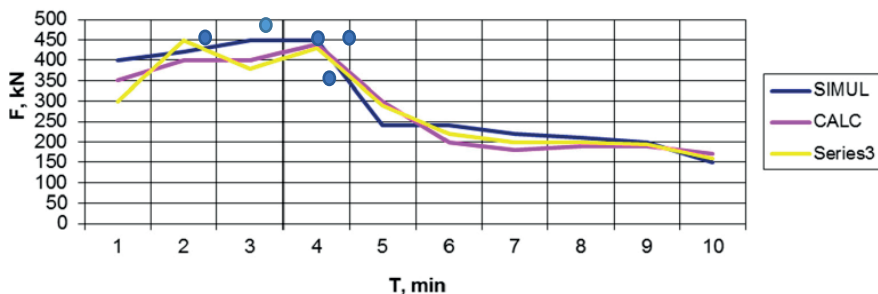


4.22 pav. Laivui ($L = 238$ m) būtina vilkiko(ų) traukimo jėga, atsižvelgiant į vėjo kryptį ir greitį (S – pietų, SW – pietvakarių, W – vakarų, NW – šiaurės vakarų, N – vakarų)

Fig. 4.22. The pulling power of the tug(s) is required for the ship ($L = 238$ m) depending on the wind direction and speed (S – south direction, SW – south-west direction, W – west direction, NW – north-west direction, N – north direction)

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Vilkiko traukos jėgos, apskaičiuotos taikant disertacijos autoriaus sukurtą metodiką, naudojant kalibruotą simulatorių ir vykdant realius eksperimentus, pateiktos 4.23 paveiksle.



4.23 pav. Vykdant laivo atšvartavimo ir nuplukdymo nuo krantinės operaciją jį veikiančios jėgos nustatomos atliekant skaičiavimus (CALC), simuliacinius tyrimus (simulatorius SIMUL) ir remiantis vilkiko darbo esant panašioms hidrometeorologinėms sąlygoms (Series3) (vėjas N – 4 m/s) eksperimentų rezultatais: ● – realių vilkimo operacijų rezultatai.

Fig. 4.23. Acting forces during the ship's mooring operation and departure from the quay were obtained by calculations (CALC), simulation studies with a simulator (SIMUL) and the tug operating under real conditions under similar hydrometeorological conditions (Series3) with a wind of N – 14 m/s: ● – the results of experiments obtained during real towing operations of similar vessels.

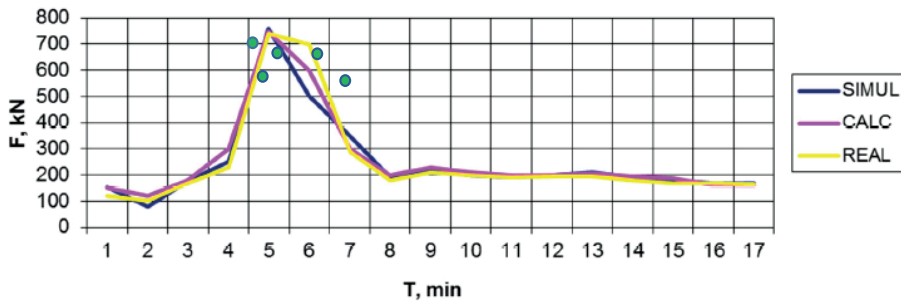
Veikiančių jėgų grafike matyti, kad vilkikas, vykdydamas atšvartavimo operaciją, naudojo iki 90 % savo galios, siekdamas įveikti susidariusias išorines jėgas, kai vykdydamas atšvartavimo operaciją laivą turėjo išjudinti iš statinės būsenos. Grafiko kreivių išsidėstymas rodo gana ryškų skaičiavimų, palyginamųjų tyrimų su realiais laivais ir simuliacinių tyrimų rezultatų sutapimą.

4.24 paveiksle matomi realiame vilkike gauti eksperimentiniai taškai artimi skaičiavimo rezultatams, kurių nuokrypis siekia iki 10 %. Vilkimo lyno tempimo jėga didžiausia operacijos pradžioje, kai siekiama laivą išjudinti iš statinės padėties, suteikti jam greičio ir atitraukti jį nuo krantinės.

Panašiomis realiomis laivo eksploatavimo sąlygomis naudojami trys vilkikai, kai didžiausia visų jų naudojama traukimo jėga kartu neviršija 700–750 kN (naudojama nuo 20 iki 75 % vilkikų traukos jėgos per visą atšvartavimo ir manevravimo operaciją).

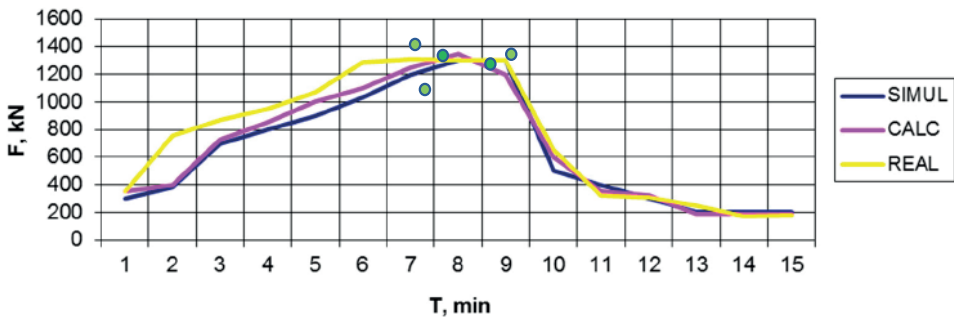
Taigi skaičiavimo būdu, taikant disertacijos autoriaus sukurtą metodiką ir vykdant simuliacinius bandymus kalibruotu simulatoriumi bei eksperimentuojant gauti rezultatai yra panašūs, tai leidžia teigti, kad sukurta vilkimo traukos jėgos ir vilkikų skaičiaus nustatymo metodika gali būti pritaikyta uostuose, siekiant iš anksto nustatyti pagrindinius vilkimo parametrus, kas ypač svarbu, užtikrinant uoste laivybos saugumą, naudojant vilkikus, kartu minimizuojant poveikį aplinkai (bereikalingai nenaudojant vilkikų).

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą



4.24 pav. Vilkimo lyno įtempimo ir vykdant traukimo-stūmimo operaciją laivą veikiančių jėgų, kai jis atšvartuojamas (CALCL), simuliacinių tyrimų, kurie gauti simulatoriumi (SIMUL), vilkikui veikiant realiomis uosto sąlygomis (REAL), kai pučia N 14 m/s vėjas, rezultatai: ● – eksperimentų rezultatai, gauti vykdant panašias laivų vilkimo operacijas

Fig. 4.24. Towline tension and forces acting during the pull/push operation when the vessel is moored (CALCL), simulation results of a study with a simulator (SIMUL) and results of a real tug operating in real conditions under similar hydrometeorological conditions (REAL) in wind N – 14 m/s: ● – the results of experiments obtained during real towing operations of similar vessels



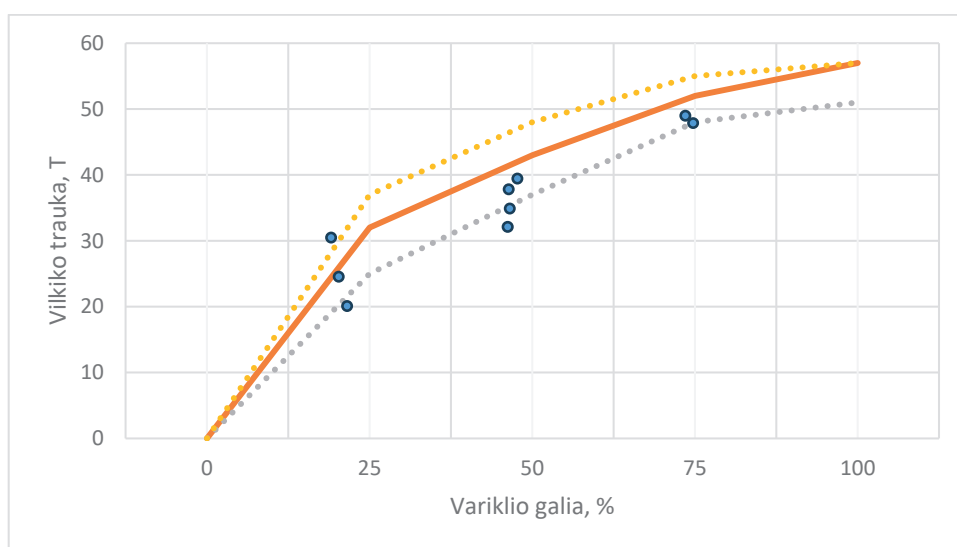
4.25 pav. Vilkimo lyno apkrova ir jėgos, veikiančios vykdant traukimo-stūmimo operaciją laivą atšvartuojant (CALCL), nustatytos atliekant matematinius skaičiavimus, simuliacinius tyrimus (simulatoriumi SIMUL) ir vilkikams veikiant realiomis sąlygomis (REAL), kai pučia 14 m/s pietų krypties vėjas: ● – eksperimentuojant gauti panašių laivų vilkimo operacijų rezultatai.

Fig. 4.25. Towing line load and acting forces during pulling/pushing operation when the ship is moored (CALCL), simulation studies with the simulator (SIMUL) and tugs operating under real conditions (REAL) in a southerly wind of 14 m/s: ● – the results of experiments obtained during real towing operations of similar vessels.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Remiantis tyrimo rezultatais, išoriniams veiksniams veikiant, vilkikai neturėtų būti apkrauti daugiau kaip 90 % pajėgumo, siekiant išvengti galimų incidentų ir užtikrinti didesnį navigacinį saugumą uoste. Jei vilkikai apkrauti daugiau kaip 90 %, reikėtų papildomai pasitelkti vieną ar daugiau vilkikų, jų skaičius ir būtina traukos jėga gali būti nustatyti taikant disertacijos autoriaus sukurtą metodiką, kuri atskleidžia galimas rizikas ir leidžia jas minimizuoti. Kartu galima išvengti perteklinio vilkikų naudojimo.

Taikant 2.5 poskyryje pateiktą metodiką gauta teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų paklaida. 4.26 paveiksle pateikta vilkiko vilkimo jėgos švartuojant laivus uoste teorinio skaičiavimo, eksperimentų realiame vilkike, vilkimo lyno įtempimo jėgos rezultatų paklaida.



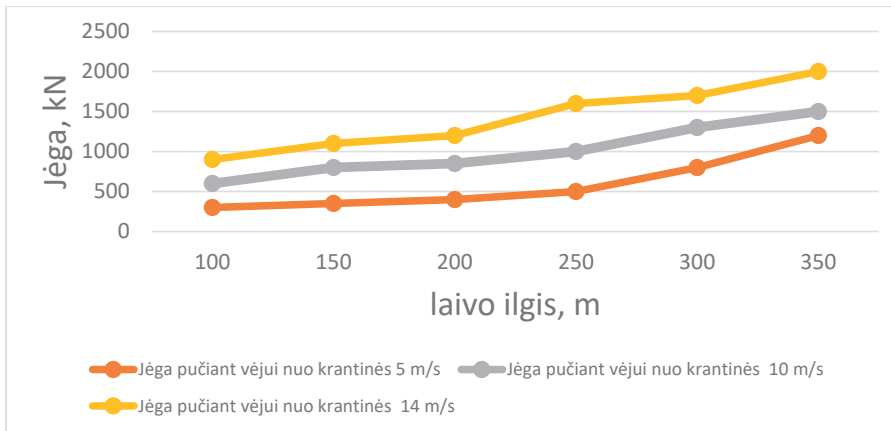
4.26 pav. Tyrimo rezultatų paklaidos pasiskirstymas: ● – tyrimo rezultatų išsidėstymas; raudona linija – skaičiavimo vidurkis; oranžinė – viršutinė paklaidos juosta; pilka – apatinė paklaidos juosta; X ašis – naudota variklio galia (nuo bendros galios), %; Y ašis – naudota vilkiko trauka, T.

Fig. 4.26. Distribution of the error of research results: ● – distribution of real experimental results; red line – average calculations; orange – upper error limit; grey – down error limit; X axis – usage engine power %; Y axis tug power, T.

Šis atvejo tyrimas atskleidė, kad disertacijos autoriaus sukurtas teorinis vilkikų traukimo jėgos skaičiavimo metodas gana tikslus (paklaida neviršija 10 %). 2.3 poskyryje aprašyta skaičiavimo metodika, kurią taikant nustatomas optimalus vilkikų skaičius ir jų traukimo jėga esant konkrečioms sąlygoms, gali būti praktiškai taikoma uostuose ir laivybos bendrovėse.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Siekiant tyrimo rezultatus pateikti universalioje forma, pasirinkta priklausomybė nuo laivo ilgio, kuris tiesiogiai koreliuoja su laivo dedveitu, be to, yra lengvai nustatomas parametras. Įvertinus Klaipėdos valstybiniam uostui būdingas vėjo kryptis sumodeliuoti ir grafikų pavidalu pateikti poveikio vertinimai (4.27–4.29 pav.). Vėjo kryptis ir greitis yra uosto navigaciniam saugumui svarbūs parametrai, kuriuos galima gana greitai sužinoti, pasitelkus uostų informacines sistemas arba lengvai išmatuoti nesudėtingais prietaisais, tad galutinius tyrimo rezultatus siekiama pateikti taip, kad juos greitai ir lengvai būtų galima panaudoti praktiškai bet kuriame pasaulyje uoste.

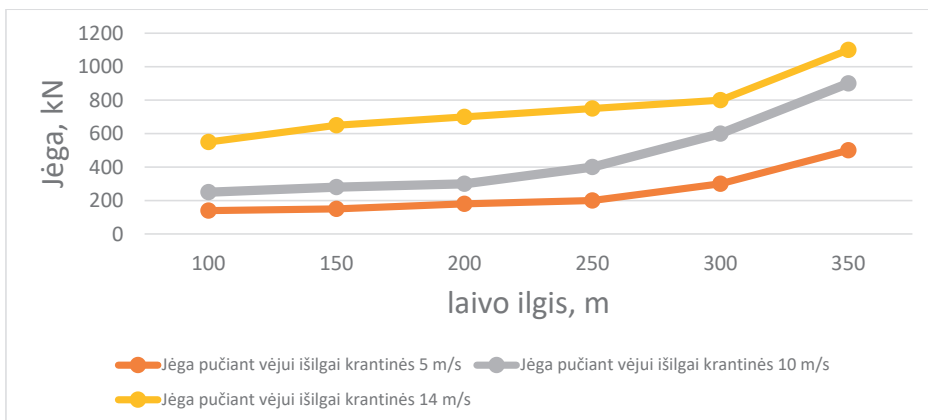


4.27 pav. Būtina vilkimo jėga, atsižvelgiant į laivo ilgį, kai nuo krantinės pučia 5 / 10 / 14 m/s stiprumo vėjas

Fig. 4.27. Towing force required in offshore winds of 5 / 10 / 14 m/s depending on the length of the vessel

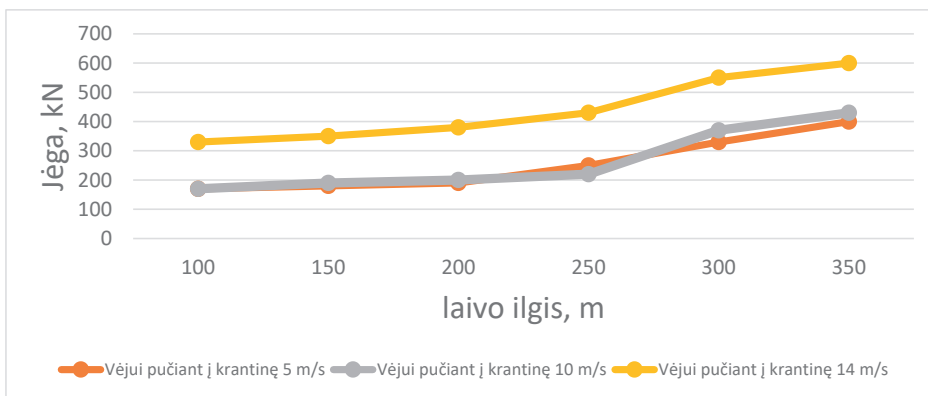
Pateiktuose tyrimo rezultatų grafikuose atsižvelgta ir į tai, kaip kinta jėga laivui manevruojant, nes jam keičiant padėtį vėjo krypties atžvilgiu korpusą ir antstatą veikiančios jėgos kinta, tad skirtingais momentais galios aptarnauti laivą ir saugiai užbaigti operaciją poreikis gali skirtis iki 20 % ir daugiau. Į šį aspektą ypač svarbu atsižvelgti, nes šio veiksnio neįvertinus gali kilti grėsmė laivų navigaciniam saugumui jiems uoste manevruojant, ypač atsišvartuojant ir prisišvartuojant bei apsisukant uosto laivų apsisukimo baseinuose.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.28 pav. Būtina vilkimo išilgai krantinės jėga, atsižvelgiant į laivo ilgį, pučiant 5 / 10 / 14 m/s stiprumo vėjui

Fig. 4.28. Required towing force in wind along the quay of 5 / 10 / 14 m/s depending on the length of the ship



4.29 pav. Būtina vilkimo jėga, atsižvelgiant į laivo ilgį, pučiant į krantinę 5 / 10 / 14 m/s stiprumo vėjui

Fig. 4.29. Required towing force in a shoreward wind of 5 / 10 / 14 m/s depending on the length of the ship

Kitas svarbus aspektas – kai kurie laivai turi papildomus pavairavimo mechanizmus, kurie padeda jiems manevruoti uoste atsišvartuojant, prisišvartuojant ir apsisukant uosto laivų apsisukimo baseine. Pavairavimo mechanizmus turintys laivai vilkikus paprastai pasitelkia vėjo greičiui pasiekus 14 m/s ir daugiau, pavairavimo

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

mechanizmas naudojamas kaip rezervas, kritiniu atveju prireikus papildomos galios. Tokio atvejo pavyzdys gali būti Klaipėdos uoste plaukiojantys linijiniai keltai, kurie manevruoja savarankiškai ir vilkikus pasitelkia tik tada, kai vėjas pasiekia ribines laivybos ribojimo normas. Laivams, turintiems papildomą pavairavimo mechanizmą, jis tokiu atveju skaičiuojamas kaip rezervas ir naudojamas tik esant būtinybei, kai vykdant operaciją nebeužtenka vilkikų traukos jėgos. Tyrimo duomenys leidžia geriau suprasti vėjo greičio ir krypties poveikį laivams manevruojant uoste, ypač ribinėmis sąlygomis, kai vėjo greitis siekia 14 m/s, ir prisideda prie navigacinio saugumo uoste užtikrinimo, leidžia įvertinti būtiną vilkikų traukos jėgą bei skaičių, gerinti vilkimo operacijos planavimą ir pasirengimą bei įvertinti galimas rizikas vykdant operaciją.

Teoriniai ir eksperimentiniai vilkikų naudojimo uoste užtikrinant navigacinį saugumą tyrimai atskleidė, kad didžiausia vilkikų traukimo jėga, apskaičiuota taikant matematinį modelį ir vykdant eksperimentinius tyrimus, yra santykinai trumpalaikė, t. y. naudojama apsukant laivą uosto laivų apsukimo baseinuose ar kitose uosto akvatorijos vietose, švartuojant ir atšvartuojant laivus.

Vykdant tyrimą maksimalios vilkikų traukos jėgos aspektu ištirtos pačios sudėtingiausios Klaipėdos uosto vietos. Nustatyta, kad maksimali vilkikų traukimo jėga būtina priplukdant laivą prie krantinės arba jį nuo krantinės nuplukdant, kai sutampa arba yra panašios krypties srovė ir vėjas. Klaipėdos uoste tokios vietos yra prie krantinių nr. 67a ir 72 (4.30 pav.), nes paprastai srovė yra iš Kuršių marių į Baltijos jūrą ir tam tikrais periodais (esant pavasario polaidžiui ar po ilgalaikių stiprių vakarų krypties vėjų, kai į Kuršių marias patenka daug jūros vandens) srovės iš Kuršių marių į Baltijos jūrą prie minėtų krantinių siekia iki 1,5–2,0 m/s.

Prie krantinės nr. 72 švartuojasi mažesni kaip HANDY SIZE tipo laivai, kurių dedveitas – iki 35 tūkst. tonų; prie krantinės nr. 67a švartuojasi mažesni kaip POST PANAMAX tipo laivai, kurių dedveitas yra iki 90 tūkst. tonų. Šių laivų ilgis siekia iki 230 m, plotis – iki 40 m, pakrauto laivo grimzlė – iki 13 m.

Nuo krantinės nr. 67a nuplukdant didelius laivus susidarydavo situacijų, kai net keturiais vilkikais, kurių kiekvieno traukimo jėga siekė iki 500 kN, laivo nepavykdavo nuo krantinės atitraukti ir tekdavo laukti, kol sumažės išorinių jėgų poveikis (vėjo greičio ir krypties bei srovės greičio). Taigi uostuose priimtoms vilkikų naudojimo taisyklėms ne visada užtikrina laivybos navigacinį saugumą, jei tinkamai neįvertintas vilkikų poreikis susiklosčius specifinėms situacijoms.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.30 pav. Klaipėdos uosto centrinė dalis (srovės kurso kampas su krantine nr. 72 sudaro apie 70 laipsnių, su krantine nr. 67a – 80 laipsnių)

Fig. 4.30. The central part of Klaipėda port (the angle of the current course with qua No. 72 is about 70 degrees, with quay No. 67a is about 80 degrees)

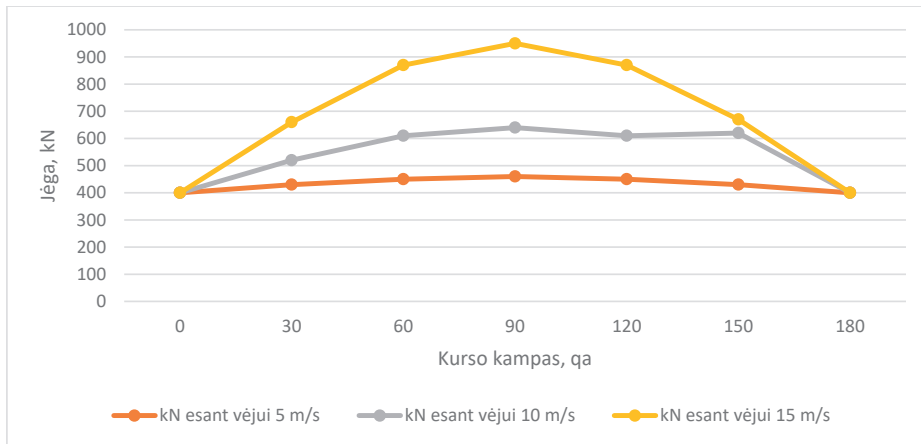


4.31 pav. Prie krantinės nr. 67a prišvartuotas POST PANAMAX biriųjų krovinių laivas

Fig. 4.31. POST PANAMAX vessel moored to berth No. 67a

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinę laivybos saugumą

Vykdamat detalius nurodytų situacijų tyrimus, (2.43) lygties pagrindu parengta skaičiavimo programa ir apskaičiuota būtina vilkikų traukimo jėga uoste susiklosčius įvairioms situacijoms. Programa nesudėtinga, ją naudojant nereikia specialių papildomų laivo duomenų, be to, ji gali būti lengvai pritaikoma bet kuriame uoste. Lygties pagrindu parengta EXCEL programa ir atlikti būtinos vilkikų traukimo jėgos skaičiavimai esant įvairioms situacijoms uoste. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.32 ir 4.33 paveiksluose. Analizei buvo pasirinkti skirtingų parametų PANAMAX tipo laivai. Vėjo kryptis krantinės atžvilgiu – nuo 0 iki 180 laipsnių, skaičiuota kas 30 laipsnių.

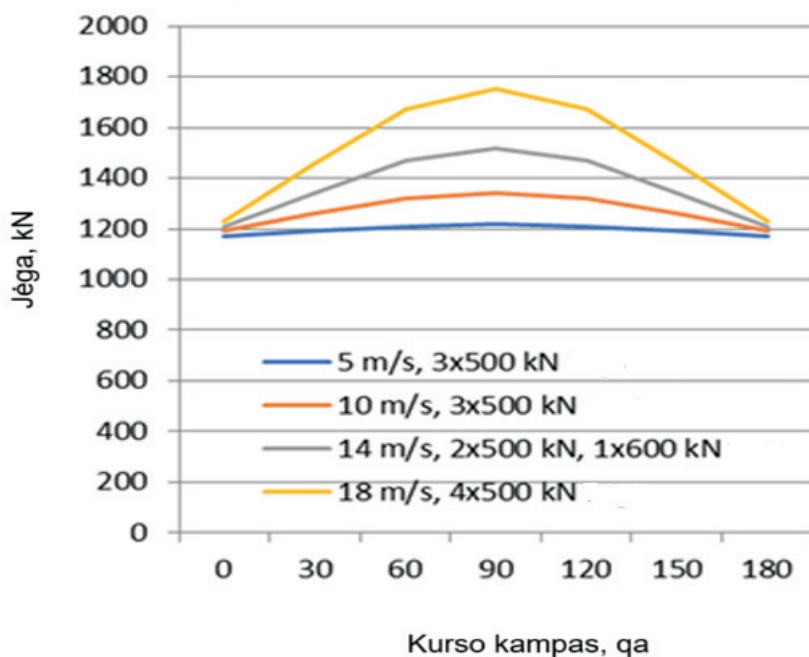


4.32 pav. Būtina vilkikų traukos jėga skirtingomis meteorologinėmis sąlygomis ir esant skirtingiems kurso kampams: Skaičiuoti pasirinktas sausakrūvis laivas, kurio: $S_x - 3500 \text{ m}^2$, srovės greitis $V_c - 0,5 \text{ m/s}$, gylis $H - 14,5 \text{ m}$, grimzlė $T - 10 \text{ m}$.

Fig. 4.32. Required bollard pull force at a different course angle and meteorological conditions: The calculation selected a dry cargo ship with following parameters

$S_x - 3500 \text{ m}^2$, current speed $- 0,5 \text{ m/s}$, depth $H - 14,5 \text{ m}$, draught $T - 10 \text{ m}$.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

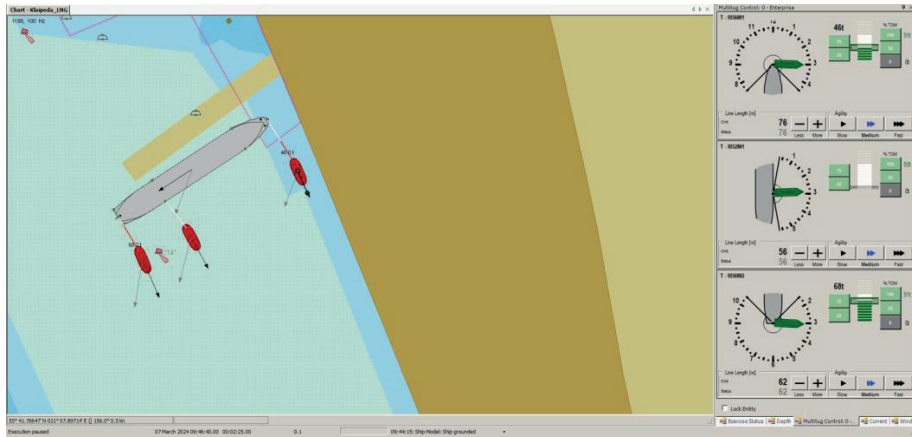


4.33 pav. PANAMAX tipo laivui ($S_x - 2500 \text{ m}^2$, gylis $H - 14,5 \text{ m}$, grimzlė $T - 12,5$) būtina vilkikų traukos jėga jį atšvartuojant nuo 67a krantinės, kai srovės greitis siekia $1,0 \text{ m/s}$ (2 mazgai), kryptis – maždaug 80 laipsnių į krantinę, vėjo greitis – nuo 5 iki 18 m/s. Nurodytas rekomenduojamas vilkikų skaičius, nustačius būtiną traukos jėgą esant atitinkamam vėjo stiprumui

Fig. 4.33. For a ship of PANAMAX size (parameters $S_x - 2500 \text{ m}^2$, depth $H - 14,5 \text{ m}$, draught $T - 12,5 \text{ m}$), the traction force (bollard pull) (kN) required of tugboats at berth No. 67a, with current speed of 1.0 m/s (2 knots) and direction of about 80 degrees to the pier and wind of various direction and speed (from 5 to 18 m/s). Also recommendations of required bollard pull force and number of tugs according different wind speed included below

Papildomai atlikti bandymai naudojant kalibruotą simulatorių. Skaičiavimo, naudojant minėtą programą, ir simuliacinių bandymų rezultatai pateikti 4.32 paveiksle. Skaičiuojant naudoti įvesties duomenys iš formulės (2.47), kuriuos keičiant, atsižvelgiant į laivo tipą, srovę, vėją ir kitus parametrus, galima nustatyti būtiną vilkikų traukos jėgą.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą



4.34 pav. Remiantis matematiniais skaičiavimais simuliatoriuje atlikus bandymą atskleista, kad esant sudėtingoms sąlygoms apskaičiuotos vilkikų traukos jėgos laivui nuo krantinės atšvartuoti pakanka

Fig. 4.34. According to the mathematical calculations, the experiment in the simulator showed that under difficult conditions, the calculated power of the tugboats is sufficient to moor the ship from the quay

Išgryninti ir atsakingoms vilkikų bendrovėms, laivų valdytojams bei kapitonams pateikti tyrimo rezultatai turėtų supaprastinti sprendimų priėmimo procesą, kai skirtingo ilgio ir dydžio laivus veikia įvairių kryptių ir greičio vėjas bei srovė, be to, užtikrinti navigacinį saugumą uoste tinkamai įvertinus vyraujančias meteorologines ir gamtines sąlygas. Pažymėtina, kad netinkamas rizikų įvertinimas ir neteisingas būtinų vilkikų traukimo jėgos parinkimas sudaro incidentų ir nelaimių prielaidas.

4.4. Skyriaus apibendrinimas

Tyrimo duomenys atskleidžia vėjo, srovės greičio ir krypties bei seklumos efekto poveikį laivų manevravimui uoste, laivams prisišvartuojant ir atsišvartuojant. Tyrimo rezultatai atskleidžia, kad meteorologinių ir hidrometeorologinių sąlygų poveikis skaičiuojant būtiną vilkikų traukos jėgą didžiulis.

Disertacijos autorius, uoste atlikęs eksperimentinius tyrimus vykdant laivo prisišvartavimo ir atšvartavimo nuo krantinės operacijas, nustatė lyno įtempimo parametrus. Iširtos įvairios vilkikų ir laivų manevravimo situacijos esant skirtingoms meteorologinėms ir hidrologinėms sąlygoms. Gauti rezultatai panaudoti tolimesniems tyrimams, kuriant matematinį modelį ir kalibruojant treniruoklį bei atliekant simuliacinius tyrimus.

4. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, jų pritaikymas, siekiant uoste užtikrinti navigacinį laivybos saugumą

Atlikti simuliaciniai tyrimai treniruokliu ir gauti palyginamieji rezultatai. Simuliacinių tyrimų rezultatai kuriant matematinį modelį ypač reikšmingi, nes suteikia vertingos informacijos dėl sistemos veikimo ir leidžia patikrinti, ar matematinis modelis pritaikomas realiomis sąlygomis. Nustatyta, kad simuliacinio tyrimo rezultatai atitinka eksperimento ką, taigi matematinis modelis yra tikslus ir gali būti validuotas.

Lyno įtempimo tyrimams taikytas vektorinis metodas ir gauti palyginamieji rezultatai su realiomis sąlygomis atliktu eksperimentu. Šie skaičiavimai svarbūs, siekiant didinti navigacinį laivybos saugumą, nes vykdant vilkimo operacijas lynu perduodama vilkiko sukuriama dinaminė traukos jėga, tad būtina tiksliai įvertinti susidariusias jėgas.

Taikant matematinį modelį parengta skaičiavimo metodika, kurią taikant ištirta situacija Klaipėdos uoste. Nustatytos būtinos vilkimo jėgos ir nurodytas reikiamas vilkikų skaičius esant skirtingam vėjo stiprumui, atitinkamai srovei ir gyliui.

Gautos tyrimų paklaidos neviršija 10 % ribos. Be to, nustatyta, kad laivui manevruojant uoste, esant tam pačiam vėjo ir srovės stiprumui, keičiantis šių jėgų poveikiui į laivo korpusą, būtina vilkiko vilkimo jėga gali išaugti iki 15 %, tad tikslus maksimalios būtinos traukimo jėgos vykdant vilkimo operaciją įvertinimas užtikrina laivų navigacinį saugumą jiems manevruojant uoste. Srovės, vėjo greičio ir krypties bei seklaus vandens poveikis skirtingo tipo ir ilgio laivams nevienodas, tad matematinis modelis, kurį taikant vertinami laivų parametrai, veikiančių jėgų poveikis bei atitinkamai nustatoma būtina vilkikų vilkimo jėga leistų tiksliau vertinti būtiną maksimalią vilkimo traukos jėgą vykdant vilkimo operaciją, tai iš dalies užtikrintų navigacinį saugumą uoste, kai tinkamai įvertinus meteorologines ir hidrologines sąlygas, atsižvelgus į laivo dydį, galima tiksliai parinkti būtiną vilkimo traukos jėgą ir vilkikų skaičių bei tinkamą vilkimo schemą.

Išvados

1. Ištyrus vilkikų naudojimo uoste, užtikrinant laivybos navigacinę saugumą, pagrįstumą, nustatyta, kad esant nestandartinėms (ribinėms) sąlygoms dėl nepakankamo ištirtumo vilkikai ne visada veiksmingai naudojami, tai lemia avarinių situacijų (iki 5 % nuo bendrų incidentų uoste) tikimybę, taigi moksliniai būtinų traukos jėgų vertinimo tyrimai, atliekami siekiant užtikrinti laivybos navigacinę saugumą, ypač svarbūs.
2. Ištyrus vilkikų naudojimą uoste, nustatyta, kad maksimali jų traukos jėga naudojama gana trumpai (prišvartuojant laivus prie krantinių ir juos atšvartuojant, paskirais atvejais apsukant laivus) – iki 10–12 minučių, bet siekiant išvengti avarinių situacijų svarbu iš anksto apskaičiuoti vilkikų (arba pavairavimo įrenginių, jeigu tokie laive yra) būtiną maksimalią traukos jėgą, pagal kurią parenkami vilkikai.
3. Disertacijos autoriaus sukurti vilkikų traukos jėgos ir vilkimo lynų įtempimo skaičiavimo metodiniai nurodymai leidžia iš anksto tiksliai nustatyti reikiamą vilkikų traukimo jėgą, panaudojant ne daugiau kaip 75 procentus vilkikų traukos jėgos (traukos jėgos atsargą paliekant nenumatytiems atvejams), įvertinus laivų parametrus ir išorines sąlygas.
4. Remiantis sudėtingų Klaipėdos uosto vietų vilkikų naudojimo aspektu teorinių ir eksperimentinių tyrimų (krantinės nr. 67a ir 72 bei kitos sudėtingos vietos)

Išvados

rezultatais, siekiant užtikrinti jų patikimumą (skaičiavimo paklaidos neviršijo 10 % gautų skaičiuojamųjų dydžių), galima tiksliai apskaičiuoti būtiną vilkikų traukos jėgą ir pagrįstai spręsti dėl jų skaičiaus bei traukimo jėgos, taip minimizuojant avarinių situacijų tikimybę.

5. Sukurta vilkikų skaičiaus ir jų traukos jėgos bei vilkimo lynų įtempimo skaičiavimo metodika patikrinta Klaipėdos uosto sąlygomis ir gali būti pritaikyta (atitinkamai adaptavus) kiekviename uoste, tai leis didinti laivybos saugumą, ypač esant ribinėms sąlygoms.

Literatūra

- Abhijit, S. 2016. “Hazards Identification and Safety Management Practices for Major Hazards in Routine Ship Towage Operation in Indian Coastal Waters.” University of Petroleum and Energy Studies (UPES), Dehradun, India. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.006>.
- Aro, Elisa, Rytter, Niels Gorm Malý, and Itälinna, Teemu. 2020. “Maritime Industry Processes in the Baltic Sea Region.” <https://ecoprodigi.eu/wp-content/uploads/2020/02/ECOPRODIGI-Research-Report-1-2020-final.pdf>.
- Artyszuk, Jaroslaw. 2013. “Types and Power of Harbour Tugs – the Latest Trends.” *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej* 98: 12.
- Aydın, Çağrı, Uğur Oral Ünal, Utku Cem Karabulut, and Kadir Sarıöz. 2018. “Practical Computational Procedures for Predicting Steering and Braking Forces of Escort Tugs.” *Ocean Engineering* 166 (February): 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.021>.
- Bertram, Volker. 2012. *Practical Ship Hydrodynamics*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2010-0-68326-X>.
- Bitner-Gregerse, Elzbieta M., Soares, Carlos Guedes, and Vantorre, Marc. 2016. “Adverse Weather Conditions for Ship Manoeuvrability.” *Transportation Research Procedia* 14: 1631–1640. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.128>.
- Bloomber. (n.d). “Global LNG Outlook 2021–25 Overview.” <https://www.bloomberg.com/professional/blog/global-lng-outlook-2021-25-overview/>.

- Bondarenko, Oleksandr V., Nekrasov, Valery O., and Yastreba, Oleksii P. 2016. “Effectiveness Harbour Tug Fleet: Problem Formulation and Methodology of Its Solution.” *Brodogradnja* 67 (2): 33–46. <https://doi.org/10.21278/brod67203>.
- BSMIR Project Team, Finnish Border Guard Headquarters. 2014. “Baltic Sea Maritime Incident Response Survey.” www.raja.fi/SAR.
- Bye, Rolf J., and Asbjørn, Gilberg. 2018. “Maritime Navigation Accidents and Risk Indicators: An Exploratory Statistical Analysis Using AIS Data and Accident Reports.”
- Çakır, E., Fışkın, R., and Bayazit, O. 2017. “An Analysis of Accidents Occurred on Tugboats.” *Pilotage / Towage Services and Technologies Congress 2017*: 1–12. <https://gemimo.org/Data/Uploads/files/PTST17.pdf>.
- CAT. (n.d.). “Product Specification for 3516B.” https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18398166.html.
- Čerka, Jonas. 2005. *Laivo eigumas*. Klaipėdos universiteto leidykla.
- Chen, Hualong, Yuanqiao Wen, Man Zhu, Yamin Huang, Changshi Xiao, Tao Wei, and Axel Hahn. 2021. “From Automation System to Autonomous System: An Architecture Perspective.” *Journal of Marine Science and Engineering* 9 (6): 645. <https://doi.org/10.3390/jmse9060645>.
- Chou, Chien Chang, Chan Chuan Wen, and Yi Jin Huang. 2021. “Analysis of Tugboat Operation and Towage Fees in a Taiwanese Port and Alternatives for Improving Tugboat Operation by the Delphi Method.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 235 (1): 176–187. <https://doi.org/10.1177/1475090220927246>.
- Djackov, Vasilij, Zapnickas, Tomas, Iamshchikov, Evgenii, Norkevicius, Lukas, Mickeviciene, Rima, and Vasiljeva, Larisa. 2023. “Experimental Investigation of Hull Form for Electric Driven Ferry.” *International Journal of Mechanical and MEchatronics Engineering* 17 (9): 331–334.
- Drobitko, O., and Drobitko, N. 2021. “Legal Regulation of Sea Towage Contracts in the EU Countries.” *Lex Portus* 7 (6). <https://doi.org/10.26886/2524-101X.7.6.2021.2>.
- European Maritime Safety Agency. 2023. “Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023 European Maritime Safety Agency” *June*: 1–66.
- Fan, S., Zhang, J., Blanco-Davis, E., Yang, Z., Wang, J., Yan, X. 2018. “Effects of Seafarers’ Emotion on Human Performance Using Bridge Simulation.” *Ocean Engineering* 170: 111–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.021>.
- Fiskin, Remzi, Cakir, Erkan, and Sevgili, Coşkan. 2021. “Decision Tree and Logistic Regression Analysis to Explore Factors Contributing to Harbour Tugboat Accidents.” *Journal of Navigation* 74 (1): 79–104. <https://doi.org/10.1017/S0373463320000363>.
- Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Maimun, A. 2015. “Theoretical and Experimental Analysis of a Slack Towline Motion on Tug-Towed Ship during Turning.” *Ocean Engineering* 99: 95–106. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.03.008>.

- Fitriadhy, A., Yasukawa, H., and Maimun, A. 2015. “Theoretical and Experimental Analysis of a Slack Towline Motion on Tug-Towed Ship during Turning.” *Ocean Engineering* 99, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.03.008>.
- Galczyński, Marcin, Ruszel, Mariusz, Turowski, Paweł, Zajdler, Robert, and Zawisza, Aleksander. 2017. *Global LNG Market*. https://www.researchgate.net/publication/317345988_Global_LNG_Market.
- Galor, W., and Kornacki, J. 2007. “Analysis of Ships Turn Manoeuvres in Port Water Area.” *TransNav : International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 1 (1): 95–100.
- Gil, M., Montewka, J., Krata, P., Hinz, T., Hirdaris, S. 2020. “Determination of the Dynamic Critical Maneuvering Area in an Encounter between Two Vessels: Operation with Negligible Environmental Disruption.” *Ocean Engineering* 213: 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107709>.
- GL Noble Denton. 2013. “Technical Policy Board Guidelines for Marine Transportations.” <http://www.gl-group.com/assets/downloads/0030-4.pdf>.
- Guache, Chloe. 2021. “Proposed Guidelines on Pre-Arrival Risk Assessments of Foreign Vessels : Using Lessons Learned to Strengthen Implementation of the UN FAO Agreement on Port State Measures.” University of California. <https://escholarship.org/uc/item/8091w57h>.
- Gucma, L. 2007. “The Risk Assessment of Ships Maneuvering on the Waterways Based on Generalized Simulation Data.” *WIT Transactions on the Built Environment* 94: 8. <https://doi.org/10.2495/SAFE070411>.
- Hampidjan. (n.d.). “Hampidjan Dynice Towing Lines.” <https://hampidjan.com.au/product/ropes-synthetic/dynice-ropes/dynice-towing-lines/>.
- Haseltalab, A., Negenborn, Rudy R. 2019. “Model Predictive Maneuvering Control and Energy Management for All-Electric Au-Tonomous Ships.” *Applied Energy* 251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113308>.
- Havsmiljöinstitutet. 2014. “Mapping Shipping Intensity and Routes in the Baltic Sea” 1: 6. http://havsmiljoinstitutet.se/digitalAssets/1506/1506887_sime_ais_report_2014_5.pdf.
- HELCOM. 2018. “Maritime Activities in the Baltic Sea.” *Smokestack Diplomacy*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6278.003.0005>.
- “IAPH.” (n.d.). <https://www.iaphworldports.org/>.
- IMO. 1968. “Recommendation on Port Advisory Services Resoluition A.158 (ES.IV) Adopted on 27 November 1968” 158 (November).
- IMO. 1972. “COLREGS – International Regulations for Preventing Collisions at Sea.” *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972*: 1–74.
- IMO. 1985. “Resolution A.578(14) Guidelines for Vessel Traffic Services.” *A 14/Res.578 578* (November): 1–17.

- IMO. 1997. “Resolution A.857(20) Adopted on 27 November 1997 Guidelines for Vessel Traffic Services” 857 (December): 1–26.
- IMO. 2010. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW)*.
- IMO. 2011. “Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto” 190 (March 2010): 1–9.
- IMO. 2021a. *Procedures for Port State Control*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/IIIS/Documents/A 33-Res.1185 – procedures for port state control, 2023 \(Secretariat\) \(1\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/IIIS/Documents/A%2033-Res.1185%20-%20procedures%20for%20port%20state%20control,%202023%20(Secretariat)%20(1).pdf).
- IMO. 2021b. *Ship-Port Interface Guide Practical Measures to Reduce GHG Emissions*. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/03/Ship-Port-Interface-Guide-compressed.pdf>.
- IMO. 2021c. “Ship/Port Interface Availability of Tug Assistance 1.” *STC Publishing*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Facilitation/FAL related nonmandatory documents/MS-C.1101Rev.3-MEPC.1Circ.409Rev.3-FAL.1Circ.100Rev.3.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Facilitation/FAL_related_nonmandatory_documents/MS-C.1101Rev.3-MEPC.1Circ.409Rev.3-FAL.1Circ.100Rev.3.pdf).
- IMO. 2023. “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.” *Resolution 377* (July): 1–17. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC 80/Annex 15.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf).
- “IMPA.” (n.d.). <https://www.impahq.org/>.
- Inácio, Miguel, Karnauskaitė, Donalda, Baltranaite, Eglė, Kalinauskas, Marius, Bogdzevič, Katarzyna, Gomes, Eduardo, and Pereira, Paulo. 2020. “Ecosystem Services of the Baltic Sea: An Assessment and Mapping Perspective.” *Geography and Sustainability I* (4): 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.11.001>.
- Inoue, S., and Lim, S. 2020. “The Course Stability of Towed Boats – When the Mass of Tow Rope Is Continued.” *West Japan Society of Naval Architects*, 43.
- International Maritime Organization. 1965. “Convention on Facilitation of International Maritime Traffic.” *Commercial Shipping Handbook, April*: 145–156. <https://doi.org/10.4324/9781315832685-53>.
- International Maritime Organization. 1978. “International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973 and Protocol of 1978 Relating Thereto (MARPOL 73/78)”: 1–38.
- International Maritime Organization. 1998. “SOLAS: The International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974” 44: 1–25.
- International Maritime Organization. 2002. “Safety of Life at Sea – Safety of Navigation Chapter V.” *SOLAS Convention*, 29.
- International Maritime Organization. 2003. “Code of Practice on Security in Ports” 32. <http://www.imo.org/ourwork/security/instruments/documents/iloimocodeof-practiceenglish.pdf>.

- International Maritime Organization. 2010. *ISM Code*. <https://www.imo.org/en/our-work/humanelement/pages/ISMCode.aspx>.
- Jakovlev, Sergej, Andziulis, Arūnas, Daranda, Andrius, Voznak, Miroslav, and Eglynas, Tomas. 2017. “Research on Ship Autonomous Steering Control for Short-Sea Shipping Problems.” *Transport 32* (2): 198–208. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1286521>.
- JCG. 2010. “New Rules for Maritime Traffic Safety in Japan Ports.” <https://www.kaiho.mlit.go.jp/syoukai/soshiki/toudai/navigation-safety/en/pdf/panhu-english.pdf>.
- Jurdziński, M. 2020. “Processes of a Freely Drifting Vessel.” *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 14*: 687–693. <https://doi.org/10.12716/1001.14.03.22>.
- Kang, Liujiang, Song Gao, and Qiang Meng. 2020. “Capacity Analysis of Ship-Tug-ging Operations in a Large Container Port.” *Asian Transport Studies 6* (June): 100011. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2020.100011>.
- Karaçay, Ömer Emre, and Osman Azmi Özsoysal. 2021. “Techno-Economic Investigation of Alternative Propulsion Systems for Tugboats.” *Energy Conversion and Management: X 12*. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100140>.
- „Klaipėdoje sukurtas inovatyvus elektrinis baržų stūmikas.“ (n.d.). <https://ve.lt/jura/klaipedoje-sukurtas-inovatyvus-elektrinis-barzu-stumikas>.
- Klaipėdos miesto savivaldybė. 2012. „Klaipėdos miesto savivaldybės teršimo incidentų likvidavimo lokalinis planas“: 1–10.
- Klaipėdos uostas. 2024. „Klaipėdos uosto statistikas.“ 2024. <https://portofklaipeda.lt/uostas/apie-klaipedos-uosta/klaipedos-uosto-statistika/>.
- Klasco. (n.d.). “Pella 16609 Tug Documentation.” <https://www.towage-klasco.lt/tugs/>.
- Kornacki J., Galor W. 2007. “Analysis of Ships Turn Manoeuvres in Port Water Area.” *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*.
- Kurowski, M., Kockritz, O., and Korte, H. 2013. “Full-State Manoeuvre Planning System for Marine Vehicles.” *IFAC Proceedings Volumes*, 144–149. <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00022>.
- Lebedevas, Sergejus, Norkevičius, Lukas, and Zhou, Peilin. 2021. “Investigation of Effect on Environmental Performance of Using Lng as Fuel for Engines in Seaport Tugboats.” *Journal of Marine Science and Engineering 9* (2): 1–19. <https://doi.org/10.3390/jmse9020123>.
- Li, Junjie, Xinyu Zhang, Bingdong Yang, and Nannan Wang. 2021. “Vessel Traffic Scheduling Optimization for Restricted Channel in Ports.” *Computers and Industrial Engineering 152* (February): 107014. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107014>.
- Li, Liang, Zhiming Yuan, and Yan Gao. 2018. “Wash Wave Effects on Ships Moored in Ports.” *Applied Ocean Research 77*: 89–105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.06.001>.

- Liebuviienė, Jūratė, and Čižiūnienė, Kristina. 2022. “Comparative Analysis of Ports on the Eastern Baltic Sea Coast.” *Logistics* 6 (1). <https://doi.org/10.3390/logistics6010001>.
- Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. 2008. *Dėl Klaipėdos valstybinio jūrų uosto laivybos taisyklių patvirtinimo*, Nr. 3-327. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.327402?jfwid=2r1mcfcu>.
- Lietuvos statistikos departamentas. (n.d.). „Jūrų transporto rodikliai.“ <https://osp.stat.gov.lt/juru-transporto-rodikliai>.
- Liujiang, Kang, Qiang Meng, and Kok ChoonTan. 2020. “Tugboat Scheduling under Ship Arrival and Tugging Process Time Uncertainty.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 144: 102125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102125>.
- Lloyd’s List Intelligence. 2024. “Vesseeel Casualty Types 1990-2021.” 2024. <https://www.lloydlistintelligence.com/knowledge-hub/data-storytelling/maritime-casualty-data-world-trade-moving>.
- M.H.A. Davis. 2016. *Markov Models and Optimization* 5. Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780203748039>.
- Magdalena Klopott. 2016. “The Baltic Sea as a Model Region for Green Ports and Maritime Transport.” *Baltic Ports Organization* 22. https://www.bpoports.com/BPC/Helsinki/BPO_report_internet-final.pdf.
- Marcon International. 2020. “Tug Market Report.” http://www.marcon.com/library/market_reports/2023/TG_May/Tug_Boat_05-23_MR.pdf.
- “MarineTraffic.” (n.d.). www.marinetraffic.com.
- Maritime and Port Authority of Singapore. 2024. “Tug Assignment Guidelines for Vessels Berthing Under Own Tug Assignment Guidelines for Vessels Berthing Under Own Power or Required To Be Towed in Basins , Rivers and Project Areas” *May*: 1–2.
- Mazaheri, Arsham, Montewka, Jakub, Kotilainen, Pentti, Sormunen, Otto Ville Edvard, and Kujala, Pentti. 2015. “Assessing Grounding Frequency Using Ship Traffic and Waterway Complexity.” *Journal of Navigation* 68 (1): 89–106. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000502>.
- Molland, A. F., Turnock, S. R., Dominic, A. and Hudson, D. A. 2017. “Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Propulsive Power.” Cambridge University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/9781316494196>.
- “MSC.” (n.d.). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-Default.aspx>.
- Nailong, Wu. 2012. *The Maximum Entropy Method*. Springer Berlin. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-60629-8>.
- Naing, Ye. 2018. “Risk Management for Vessels Maneuvering in Yangon Port.” *Eurasian Journal of Analytical Chemistry* 13 (6): 542–549. <https://www.researchgate>.

- net/publication/332330408_Risk_Management_for_Vessels_Maneuvering_in_Yangon_Port.
- “NCSR.” (n.d.). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/NCSR-default.aspx>.
- Nitonye, Samson, Adumene, Sidum, and Howells, Ukpokpo Umorami. 2017. “Numerical Design and Performance Analysis of a Tug Boat Propulsion System.” *Journal of Power and Energy Engineering* 05 (11): 80–98. <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.511007>.
- Olba, X. B., Daamen, W., Hoogendoorn, S. P. 2018. “State-of-the-Art of Port Simulation Models for Risk and Capacity Assessment Based on the Vessel Navigational Behavior through the Nautical Infrastructure.”
- Olsen, Alexander Arnfinn. 2023. *Merchant Ship Types*. <https://doi.org/10.1201/9781003342366>.
- Özden, Münir Cansın. 2021. “Development of Experimental Captive and Free-Running Manoeuvring Systems and Their Cross-Validation.” *Istanbul Technical University, April*: 182. <http://hdl.handle.net/11527/20314>.
- Ozoga, B., Montewka, J. 2018. “Towards a Decision Support System for Maritime Navigation on Heavily Trafficked Basins.” *Ocean Engineering* 159: 88–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.073>.
- Park, Seung Hyeon, Lee, Seung Jae, and Lee, Sungwook. 2021. “Experimental Investigation of Towing – and Course-Stability of a FPSO Towed by a Tug-Boat with Lateral Motion.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 13: 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.11.003>.
- Paulauskas Vytautas. 2013. *Ships Entering the Ports*. Klaipėdos universiteto leidykla.
- Paulauskas, Vytautas ir Paulauskas, Donatas. 2009a. *Laivo valdymas uoste*. Klaipėdos universiteto leidykla.
- Paulauskas, Vytautas. 2009b. *Ship's Steering in Port Areas*. Klaipėda University Publish House.
- Paulauskas, V., Paulauskas, D., Wijffels, J. 2008. “Ships Mooring in Complicated Conditions and Possible Solutions.” *Transport Means – Proceedings of the International Conference*.
- Paulauskas, V., Paulauskas, D., Wijffels, J. 2009. “Ship Safety in Open Ports.” *Transport*.
- Paulauskas, D. Paulauskas, V. 2023. “Impact of Port Clearance on Ships Safety, Energy Consumption and Emissions.” *Applied Sciences (Switzerland)* 13 (9). <https://doi.org/10.3390/app13095582>.
- Paulauskas, Donatas. 2019a. „Laivų manevrinių savybių ir jų ryšio su uosto infrastruktūros parametrais tyrimai.“ <http://www.libis.lt/showRecordDetails.do?recordNum=19&biId=236298783&catalog=false&resId=&previewUrl=undefined&epaveldas=f>.

- Paulauskas, Donatas. 2019b. "Laiivų Manevrinių Savybių Ir Jų Ryšio Su Uosto Infrastruktūros Parametrais Tyrimas." <http://www.libis.lt/showRecord-Details.do?recordNum=19&biId=236298783&catalog=false&resId=&previewUrl=undefined&epaveldas=f>.
- Paulauskas, Vytautas. 2006. "Navigational Risk Assessment of Ships." *Transport 21*: 12–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3846/16484142.2006.9638034>.
- Paulauskas, Vytautas, Filina-Dawidowicz, Ludmiła, and Paulauskas, Donatas. 2020. "The Method to Decrease Emissions from Ships in Port Areas." *Sustainability (Switzerland) 12* (11): 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12114374>.
- Paulauskas, Vytautas, Henesey, Lawrence, Plačiene, Birute, Jonkus, Martynas, Paulauskas, Donatas, Barzdžiukas, Raimondas, Kaulitzky, Artur, and Simutis, Martynas. 2022. "Optimizing Transportation between Sea Ports and Regions by Road Transport and Rail and Inland Waterway Transport Means Including 'Last Mile' Solutions." *Applied Sciences (Switzerland) 12* (20). <https://doi.org/10.3390/app122010652>.
- Paulauskas, Vytautas, Senčila, Viktoras, Paulauskas, Donatas, and Simutis, Martynas. 2023. "Impact of Port Shallowness (Clearance under the Ship's Keel) on Shipping Safety, Energy Consumption and Sustainability of Green Ports." *Sustainability 15* (22): 15802. <https://doi.org/10.3390/su152215802>.
- Paulauskas, Vytautas, Simutis, Martynas, Plačiene, Birute, Barzdžiukas, Raimondas, Jonkus, Martynas, and Paulauskas, Donatas. 2021. "The Influence of Port Tugs on Improving the Navigational Safety of the Port." *Journal of Marine Science and Engineering 9* (3). <https://doi.org/10.3390/jmse9030342>.
- Peng, Du, Ouahsine, A., Tran, K. T., and Sergeant, P. 2018. "Simulation of the Overtaking Maneuver between Two Ships Using the Non-Linear Maneuvering Model." <https://link.springer.com/article/10.1007/s42241-018-0090-x>.
- Perkovic, Marko, Brcko, Tanja, Luin, Blaz, and Vidmar, Peter. 2016. "Ship Handling Challenges When Vessels Are Outgrowing Ports." *International Navigation Simulator Lecturers Conference, September*. https://www.researchgate.net/publication/308111648_Ship_Handling_Challenges_When_Vessels_are_Outgrowing_Ports.
- Petersen, Joseph Lee. 2007. "Estimating the Parameters of a Pareto Distribution Introducing a Quantile Regression Method." *University of Montana 2* (1999): 15–17. <http://hsapp.hs.umt.edu/employee-database/index.php/pubtools/serveFile/files/5188/pareto.pdf>.
- Piaggio, Benedetto, Viviani, Michele, and Martelli, Michele. 2018. "Escort Tug Hydrodynamic Forces Estimation in a Design Framework: From Model Test to Manoeuvrability Simulation." *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE 11B* (June). <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-78052>.
- Piaggio, Benedetto, Viviani, Michele, Martelli, Michele, and Figari, Massimo. 2019. "Z-Drive Escort Tug Manoeuvrability Model and Simulation." *Ocean Engineering 191* (October): 106461. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106461>.

- Plotnikova, Elena, Vienožindienė, Milita, and Slavinskas, Stasys. 2022. “Development of Inland Waterway Transport as a Key to Ensure Sustainability: A Case Study of Lithuania.” *Sustainability (Switzerland)* 14 (17): 1–15. <https://doi.org/10.3390/su141710532>.
- Prabowo, Aditya Rio, Martono, Evan, Muttaqie, Teguh, Tuswan, Tuswan, and Bae, Dong Myung. 2022. “Effect of Hull Design Variations on the Resistance Profile and Wave Pattern: A Case Study of the Patrol Boat Vessel.” *Journal of Engineering Science and Technology* 17 (1): 106–126.
- Quy, M. N., Łazuga, K., Gucma, L., Vrijling, J. K., and Van Gelder, P. H. A. J. M. 2020. “Towards Generalized Ship’s Manoeuvre Models Based on Real Time Simulation Results in Port Approach Areas.” *Ocean Engineering* 209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107476>.
- Rawson K. J., Tupper E.C. 2001. *Basic Ship Theory (Fifth Edition)*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5398-5.X5000-6>.
- Roubos, Alfred, Groenewegen, Leon, and Peters, Dirk Jan. 2017. “Berthing Velocity of Large Seagoing Vessels in the Port of Rotterdam.” *Marine Structures* 51: 202–217. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.10.011>.
- S&P Global. 2024. “IHS Maritime & Trade Solutions Guide.” <https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-Maritime-Trade-Solutions-Guide.pdf>.
- Senčila, V., Zažeckis, R., Jankauskas, A., and Eitutis, R. 2020. “The Use of a Full Mission Bridge Simulator Ensuring Navigational Safety during the Klaipėda Seaport Development.” *TransNav* 14 (2): 417–424. <https://doi.org/10.12716/1001.14.02.20>.
- Serhii, Zinchenko, Tovstokoryi, Oleh, Nosov, Pavlo, Popovych, Ihor, and Kyrychenko, Kostiantyn. 2023. “Pivot Point Position Determination and Its Use for Manoeuvring a Vessel.” *Ships and Offshore Structures* 18 (3): 358–364. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>.
- Shipowners. 2015. “Loss Prevention: Tugs and Tows – a Practical Safety and Operational Guide” 90. www.ukho.gov.uk.
- Shkëlqim, Sinanaj. 2014. “The Impact of Shipping Accidents on Marine Environment: A Study of Turkish Seas.” *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 10 (1): 9–23. <https://doi.org/10.17265/2159-5879/2020.01.005>.
- Simutis, M. 2021. “Overview of Safety Aspect into Ports: Port Tug Impact Research.” *Transport Means – Proceedings of the International Conference 2021-October*: 1092–1097.
- Singh, Abhijit, and Raju, T. Bangar. 2016. “Hazards Analysis of Routine Ship Towing Operations in Indian Coastal Waters.” *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* 4: 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.006>.
- Sterling, Todd. 2010. “Evaluating Emission Benefits of a Hybrid Tug Boat.” https://www2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-12/hybridreport1010_remediated.pdf.
- Strem, K. 2004. *Ship’s Handling*. FORCE Technology.

- Sun, Changping, Li, Mengxia, Chen, Linying, and Chen, Pengfei. 2024. “Dynamic Tugboat Scheduling for Large Seaports with Multiple Terminals.” *Journal of Marine Science and Engineering* 12 (1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010170>.
- Šilas, Giedrius, and Rapalis, Paulius. 2021. “Review of Methods and Models for Estimating Ship Emissions in Port.” *Transport Means* 2021. <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-Means-2021-Part-II.pdf>.
- Taimuri, G., Matusiak, J., Mikkola, T., Kujala, P., and Hirdaris, S. A. 2020. “6-DoF Maneuvering Model for the Rapid Estimation of Hydrodynamic Actions in Deep and Shallow Waters.” *Ocean Engineering* 218: 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108103>.
- Theirs, G. F., Jansses, G. K. A. 1998. “Port Simulation Model as a Performance Decision Instrument.” *The Society for Modeling & Simulation International*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/003754979807100206>.
- Toma, A., Oncica, V., and Atodiresei D. 2016. “The Study of Ships Behavior during Port Maneuvering with Tugs. ‘Mircea Cel Batran.’” *Naval Academy Scientific Bulletin* 19: 109–115. <https://doi.org/10.21279/1454-864x-16-i2-017>.
- United Nations. 1982. “United Nations Convention on the Law of the Sea.” *Ocean Development and International Law*. <https://www.imo.org/en/ourwork/legal/pages/unitednationsconventiononthelawofthesea.aspx#:~:text=The United Nations Convention on,the oceans and their resources>.
- United Nations. 2023. “Review of Maritime Transport 2023.” <https://doi.org/10.1787/41464f87-en>.
- USAID, U.S. Department of Energy, USEA. 2018. “Global LNG Fundamentals.” *Understanding Natural Gas and LNG Options*, 231.
- Thor, F. I. 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119994138>.
- Timoshenko, V. F. 2013. “Resistant and Propellers of Surface Displacement Ships.” *Department Education and Science of Ukraine*, 137.
- Vakrina, Eduardas. 2007. *Matematinės statistikos pradmenys. Statistinių duomenų analizė naudojant MS Excel*. https://vilniustech.lt/files/528/26/1/1_0/vakrina-excel.pdf.
- Verseckaitė, Ieva, and Jakubavičius, Artūras. 2024. “Shipbuilding Tendencies in the Context of Digitalization.” *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.3846/mla.2024.19945>.
- Vivekanandan, N. 2012. “Comparison of Estimators of Extreme Value Distributions for Wind Data Analysis.” *Bonfring International Journal of Data Mining* 2 (3): 16–20. <https://doi.org/10.9756/bijdm.1503>.
- Wu, Gongxing, Zhao, Xiaolong, Sun, Yushan, and Wang, Linling. 2021. “Cooperative Maneuvering Mathematical Modeling for Multi-Tugs Towing a Ship in the Port Environment.” *Journal of Marine Science and Engineering* 9 (4): 384. <https://doi.org/10.3390/jmse9040384>.

- Wu, Gongxing, Zhang, Jiawei, Li, Guofu, Wang, Linling, Yu, Qiang, and Guo, Jiamin. 2022. "Identification Method of Nonlinear Maneuver Model for Unmanned Surface Vehicle from Sea Trial Data Based on Support Vector Machine." <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-022-0743-0>.
- Xiaoyang, We, Jis, Shuai, Meng, Qiang, Choon Tan, Kok. 2020. "Tugboat Scheduling for Container Ports. Transportation Research." *Logistics and Transportation Review* 142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102071>.
- Xu, Haitong, Hinostroza, M. A., Wang, Zihao, and Guedes Soares, C. 2020. "Experimental Investigation of Shallow Water Effect on Vessel Steering Model Using System Identification Method." *Ocean Engineering* 199. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002980182030024X>.
- Xue, Jie, Chaozhong, Wu, Zhijun, Chen, Xiaoxuan, Chen. 2017. "A Novel Estimation Algorithm for Interpolating Ship Motion." *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047821>.
- Yıldırım, Umut, Başar, Ersan, and Uğurlu, Özkan. 2019. "Assessment of Collisions and Grounding Accidents with Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) and Statistical Methods." *Safety Science* 119: 412–425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.022>.
- Zalewski, P., Montewka, J. 2007. "Navigation Safety Assessment in an Entrance Channel, Based on Real Experiments. Guedes-Soares & Kolev Maritime Industry." *International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean 12*: 1113–117. <https://research.aalto.fi/en/publications/navigation-safety-assessment-in-an-entrance-channel-based-on-real>.
- Zhichao, Hu, Mou, Junmin, Chen, Linying, Jia, Xuefei, and Chen, Pengfei. 2023. "Model Predictive Control Framework for Green and Smart Tug Escorting." *Ocean Engineering* 280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114539>.
- Zou, Xiong, Zhan, Wenqiang, Xiao, Changshi, Zhou, Chunhui, Chen, Qianqian, Yang, Tiantian, and Liu, Xin. 2020. "A Novel Vision-Based Towing Angle Estimation for Maritime Towing Operations." *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (5). <https://doi.org/10.3390/JMSE8050356>.

Disertacinio darbo aprobavimas mokslo leidiniuose

Straipsniai, išspausdinti recenzuojamuose tarptautiniuose leidiniuose

- V. Paulauskas, M. Simutis, B. Plačienė, R. Barzdžiukas, M. Jonkus, D. Paulauskas. 2021. The Influence of Port Tugs on Improving the Navigational Safety of the Port. (IF=2,05) (Q2). *Journal of Marine Science and Engineering. J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(3), 342; <https://doi.org/10.3390/jmse9030342>
- V. Paulauskas, L. Henesey, B. Plačiene, M. Jonkus, D. Paulauskas, R. Bardzdžiukas, A. Kaulitzky, M. Simutis. 2022. “Optimizing Transportation between Sea Ports and Regions by Road Transport and Rail and Inland Waterway Transport Means Including “Last Mile” Solutions” (IF=2.83) (Q2). *Applied Science. Appl. Sci.* 2022, 12(20), 10652; <https://doi.org/10.3390/app122010652>
- V. Paulauskas, V. Senčila, D. Paulauskas, M. Simutis. 2023. “Impact off Port Shallowness (Clearance under the Ship’s Keel on Shipping Safety, energy Consumptions and Sustainability of Green Ports” (IF=3.9) (Q1). *Sustainability. Sustainability* 2023, 15(22),15802; <https://doi.org/10.3390/su152215802>
- V. Paulauskas, D. Paulauskas, M. Simutis. 2024. “Estimation of pulling power (bollard pull) of tugs and number of tugs during ship mooring operations” (IF=2.7) (Q2). *Journal of Marine Science and Engineering. J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12(11), 1959; <https://doi.org/10.3390/jmse12111959>

Straipsniai, išspausdinti periodiniuose leidiniuose, kurie įtraukti į Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamus leidinius [ISI Proceedings]

- Paulauskas, Vytautas; Henesey, Lawrence; Paulauskas, Donatas; Simutis, Martynas. Optimizing transportation between ports and the hinterland for decreasing impact to the environment // Proceedings of the 24th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistic Modeling and Simulation (HMS 2022) : Rome, Italy, September 19-21, 2022. Lecce : CAL-TEK, 2022. ISBN 9788885741744, p. 1-14, ISBN 9788885741744. Scopus. [20.500.14172/1514] [2022] [T003] [P1a2] [AL: 1] [AI: 0.25] [IT]
- Simutis, Martynas. Mathematic modelling of towing operation // Transport means 2022. Sustainability: research and solutions : proceedings of the 26th international scientific conference : October 5-7, 2022, online conference, Kaunas, Lithuania, t. 2, p. 932 - 936, ISSN 1822-296X, 2351-7034. Scopus. [20.500.14172/24364] [2022] [T003; T009] [P1a2] [AL: 0.357] [AI: 1] [LT]
- Simutis, Martynas. Overview of safety aspect into ports: port tug impact research // Transport means 2021. Sustainability: research and solutions : proceedings of the 25th international scientific conference : October 6-8, 2021, online conference, Kaunas, Lithuania. Kaunas : Kaunas University of Technology, 2021, pt 3, p. 1092-1097, ISSN 1822-296X, 2351-7034. Scopus. [20.500.14172/10962] [2021] [T009] [P1a2] [AL: 0.429] [AI: 1] [LT]

Konferencijos, kuriose buvo paskelbti disertacijos tyrimų rezultatai

- „Transport means 2021“ *“Overview of Safety Aspect into Ports: Port Tug Impact Research”*. M. Simutis
- „Transport means 2022“ *„Mathematical modeling of towing operation”*. M. Simutis
- „I3M 2022“ International multidisciplinary modeling & simulation multiconference. Straipsnio bendraautorius. Straipsnio tema *“Optimizing transportation between ports and the hinterland for decreasing impact for environment”* V. Paulauskas, L. Henesey, D. Paulauskas, M. Simutis
- „Transport means 2023“ *pranešimo skaitymas. Pranešimo tema „The influenc of port tugs on improving the navigational safety of the port”*. M. Simutis

GYVENIMO APRAŠYMAS (CV)

| | | | |
|---|------------------|---|--|
|  | Martynas Simutis | | |
| | | | <i>martynas.simutis@ku.lt</i> |
| ĮGYTAS IŠSILAVINIMAS IR KVALIFIKACIJA | <i>Metai</i> | Įstaigos pavadinimas, padalinys | Įgytos profesinės kvalifikacijos, akademiniai vardai |
| | Nuo 2020 | Klaipėdos universitetas, transporto inžinerijos doktorantūra | |
| | 2010-2012 | Klaipėdos universitetas | Inžinierius mechanikas (magistras) |
| | 2006-2010 | Vilniaus Gedimino technikos universitetas | Inžinierius mechanikas (bakalauro) |
| | 1996-2006 | Klaipėdos Ažuolyno gimnazija | Vidurinis išsilavinimas |
| DARBOVIETĖS, JOSE UŽIMTOS PAREIGOS | <i>Metai</i> | <i>Darbovietės, padalinio pavadinimas</i> | <i>Pareigos</i> |
| | Nuo 2017 | Klaipėdos universitetas, inžinerijos katedra | Lektorius |
| | Nuo 2015 | UAB „Gitana“ | Produktų vadybininkas |
| | 2014-2015 | UAB „Vakarų vamzdinių sistemų“ | Projektų inžinierius |
| | 2013-2013 | UAB „Vakarų vamzdinių sistemų“ | Marketingo specialistas |
| KITI KVALIFIKACIJOS RODIKLIAI 2018-2024 | <i>Metai</i> | | <i>Pareigos juose</i> |
| | 2024 | Transport means tarptautinė konferencija | <i>Dalyvis</i> |
| | 2023 | Transport means tarptautinė konferencija | <i>Dalyvis</i> |
| | 2023 | Prince2 projektų valdymo kursai | <i>Dalyvis</i> |
| | 2023 | Stazuotė Genujos universitete (2023.02 – 05). Stazuotės metu pristatyti disertacijos tyrimų rezultatai. | <i>Dalyvis</i> |
| | 2022 | Praktika/stazuotė AB „Klaipėdos jūrų krovinių kompanija“ (2022.07.11 – 2022.08.31) | <i>Dalyvis</i> |
| | 2022 | Transport means tarptautinė konferencija | <i>Dalyvis</i> |
| | 2021 | Transport means tarptautinė konferencija | <i>Dalyvis</i> |
| | 2020 | Transport means tarptautinė konferencija | <i>Dalyvis</i> |
| | 2019 | Tęstiniai derybų mokymai. Rengėjas Scotwork. Vedėjas Gintautas Klusas | <i>Dalyvis</i> |
| | 2019 | Vadovavimo įgūdžių mokymai „Boso valanda“. Rengėjas Saulius Jovaiša | <i>Dalyvis</i> |
| | 2018 | Strateginio planavimo mokymai. Vedėjas Remigijus Savickas | <i>Dalyvis</i> |

Summary in English

Introduction

Problem Formulation

To ensure the navigational safety of a port, the smooth operation of tugboats must be guaranteed. The size, draft, and other characteristics of a ship depend on the type of cargo being transported and the distance it needs to travel. In modern ports, ships of various types and sizes dock, transporting diverse cargoes, including hazardous materials such as chemicals, liquefied natural gas, and oil. Furthermore, as ships continue to grow larger, many ports are facing the problem of accommodating ships under limited port parameters, where it is especially important to carefully plan and assess ship maneuvering operations. The potentially most dangerous and complex phases of ship maneuvering involve passing through port gates, docking at or undocking from quays, and turning in the port basin. During these operations, tugboats frequently assist in safely performing the maneuvers.

Looking at the latest trends in global shipping, it is clear that the design and construction of increasingly larger ships present challenges in terms of safely servicing ships in ports in the shortest possible time, with the aim of maintaining and enhancing port competitiveness. Incidents in ports or long towing operations and ship servicing

times are financially significant, as they are directly related to lost revenue or, in cases of accidents or disasters, large financial and often ecological losses. Inefficient use of the port's available tugboats increases CO₂ emissions.

In this context, it is important to develop a methodology that can be used to calculate the necessary towing force and the minimum number of tugboats required for towing operations, taking into account ship parameters and non-standard or extreme meteorological conditions, to ensure the safe operation of the port.

Scientific Problem

In order to ensure shipping safety in a port, allowing the port to accommodate incoming ships of a specified size and ensure their navigational safety, it is necessary to determine the minimum number of tugboats required and their towing force, to safely carry out ship maneuvering operations. It must be noted that ports often lack a common methodology for determining the minimum number of tugboats needed under extreme shipping conditions, where navigational safety is not adequately ensured within the port and its approaches.

The depth and width of port entrance channels, port basin dimensions, and quay technical parameters determine the ability of incoming ships to maneuver safely. In many cases, tugboats are employed to ensure navigational safety. Therefore, to develop a methodology for the operation of port tugboats to safely service ships, it is necessary to conduct studies to determine the minimum number of tugboats and their required towing force in each specific case.

The guidelines for safe shipping, as presented in the directives and regulations of the International Maritime Organization (IMO), include recommendations for the safe maneuvering of ships in ports, often providing general guidance without considering the specific conditions of each port (IMO, 2021a).

Up to this point, determining the minimum number of tugboats and towing force has been based on local standards or specific port rules, considering typical port conditions. However, in many cases, specific challenges arise for which these standards do not offer solutions.

Since existing methodologies and standards for selecting the minimum number of tugboats and their towing force give minimal consideration to meteorological and hydrodynamic conditions, navigational accidents in ports and their approaches remain a significant issue.

This dissertation addresses the scientific problem of determining the minimum number of tugboats and their towing force under extreme meteorological and hydro-meteorological conditions, as well as in non-standard situations. The methodology takes into account current and wind speeds and directions, as well as the effects of shallow water, based on research results that can be applied to rationally plan the operation of port tugboats and increase the safety of navigation in ports.

Aim of the Dissertation

The aim of this dissertation is to develop methodological principles, based on theoretical and experimental research results, for determining the towing force of tugboats and the necessary number of tugboats to improve the navigational safety of ships in ports. Additionally, the study aims to propose practical, effective methods and solutions for using tugboats in ports to reduce the potential risk of ship maneuvering under complex conditions, including varying current and wind strengths and the effects of shallow water.

Objectives of the Dissertation

- To analyze scientific research and practical cases related to the use of tugboats in ship docking and undocking operations in ports, and evaluate the methodologies for selecting towing force presented in regulatory documents.
- To conduct experimental studies on the towing force of tugboats under real conditions and their numerical modeling, using the research results to develop a methodology for calculating tugboat towing force.
- Based on the results of experimental and numerical modeling, as well as analytical solutions, to develop the methodological principles for using tugboats in ports to ensure safe navigation.
- To develop practical methodological solutions for the optimal use of tugboats in ports.

Scientific Novelty

1. Methodological foundations for determining the number of tugboats and their towing force in ports, considering ship parameters and natural conditions, have been developed. These foundations will allow for more accurate assessments of tugboat efficiency to ensure the safe passage of ships through port channels and their mooring operations under non-standard or borderline situations.

2. Methodological principles for the rational use of tugboats to improve navigational safety in ports have been prepared.

Theses Defended by the Dissertation

1. Based on the results of theoretical and experimental research, complex methodological foundations for assessing the number of port tugboats and their towing force have been created to ensure navigational safety in ports under extreme and borderline conditions.

2. Comprehensive methodological foundations for tugboat use in ports have been developed. These foundations allow for determining the optimal required tugboat towing force, taking into account ship parameters and meteorological conditions (wind speed and direction, current speed, and the influence of shallow water), as well as assessing towing operation schemes to ensure navigational safety in ports.

Practical Significance

The developed foundations of the methodology for calculating the maneuvering characteristics of ships and tugboats in port waters allow for determining the optimal number of tugboats and towing force, ensuring the safety of towing operations in complex conditions. The model developed for studying the maneuvering characteristics of ships and tugboats under complex conditions enables:

- Clarifying the maneuvering characteristics of ships and tugboats in port waters while performing various operations;
- Ensuring the safety of navigation in port approaches and waters;
- Determining the optimal number of tugboats and towing force to reduce the duration of towing operations, which in turn reduces ship costs;
- Developing the optimal towing scheme to ensure the safety of tugboat operations.

Based on the results of the study, the available port tugboat resources can be used more efficiently.

Methodology

Analytical, experimental, and mathematical modeling methods were used in the research. Experimental studies of ship maneuvering parameters were carried out on the KLASCO 1 and KLASCO 3 tugboats using the calibrated “SimFlex Navigator” simulator. Measurements were taken and data were collected using navigation and various towing parameter recording equipment installed on the tugboats, as well as meteorological and hydrometeorological measuring devices. Mathematical modeling, calculations, and data processing were performed using the Matlab software package. The accuracy of the obtained results was assessed using statistical mathematical methods.

1. Analysis of Ship Maneuverability and Port Tug Usage in International Requirements

The modern operations of a port cannot be imagined without the assistance of tugboats for ships. Tugboats ensure the safe maneuvering of ships in port channels, turning maneuvers, berthing, and unberthing. Several main types of tugboats can be distinguished today: conventional tugboats with a fixed-pitch propeller, azimuth stern drive tugboats (ASD), and tractor tugboats (Voith-Schneider). Each type of tugboat has specific technical characteristics and a range of applications. Therefore, choosing the optimal tugboat requires considering several key factors, such as the port's geographical conditions, the size and characteristics of the serviced ships, and prevailing meteorological and environmental conditions. Many modern ships have additional steering mechanisms that partially substitute the functions of tugboats. Oil tankers, chemical carriers, LNG carriers, and bulk carriers often do not have such steering mechanisms, so their maneuvering and navigational safety in the port are ensured by tugboats.

Tugboats, ensuring port safety, help ships maneuver when entering and leaving the port, navigating port channels, turning, berthing, and unberthing. In some cases, tugboats also perform fire-fighting and rescue operations and serve as icebreakers in the port's waters and channels. Generally, the number of tugboats and their towing force are determined based on experience, which is not always optimal.

Maritime transport is one of the fastest-growing transportation modes globally. It is responsible for transporting 80% of the world's goods, with the Baltic Sea handling around 15% of the global shipping intensity. There are approximately 2,000 ships constantly navigating the Baltic Sea, with an additional 3,500–5,000 ships traveling regular routes, one of their stops being a Baltic Sea port. Between 2011 and 2022, 25,614 maritime incidents occurred in the Baltic Sea and its ports, resulting in 230 ship sinkings, 7,694 injuries, and 696 deaths.

Ensuring navigational safety in ports and at sea is a global priority, with numerous studies addressing the issues of human error, equipment failure, infrastructure, and the peculiarities of ship maneuvering. Incidents in ports or at sea often lead to financial and environmental losses, making the prevention of such incidents one of the key focuses of maritime research, particularly concerning ship maneuverability and human error.

In the Baltic Sea, passenger and cargo ships (RO-RO and RO-PAX types) make up most vessels, while 22% of ships are oil and chemical tankers (HELCOM 2018). Most shipping incidents occur in port approaches and ports, with 55% of them involving grounding, ship collisions, and equipment failure.

Ensuring navigational safety in port approaches and within ports is paramount, with port tugboats playing a vital role in preventing recurring accidents, which can lead to material losses and environmental damage.

1.1 Analysis of Scientific Research on Ship Maneuverability and Port Tug Usage

The modern operations of a port cannot be imagined without the assistance of tugboats for ships. They ensure the safe maneuvering of ships in port channels, assist in turning maneuvers, and facilitate berthing and unberthing. Currently, several main types of port tugboats are distinguished: conventional tugboats with standard fixed-pitch propellers, tugboats with azimuth stern drive (ASD) propulsion systems, and tractor tugboats (such as Voith-Schneider) (Artyszuk 2013). Each type of tugboat has its own specific technical features and application range. Therefore, selecting the optimal tugboat requires considering several key factors, such as the geographical conditions of the port, the size and characteristics of the serviced vessels, and the prevailing meteorological and environmental conditions.

Many modern vessels are equipped with additional maneuvering mechanisms, such as thrusters, which partly replace the functions of tugboats. However, many vessels, particularly oil tankers, chemical carriers, LNG carriers, and bulk carriers, lack these mechanisms, meaning their maneuvering and navigational safety in the port rely on tugboats (Aydin et al., 2018; Kornacki 2007; Toma Oncica 2016).

Port tugboats contribute significantly to navigational safety by assisting vessels in entering and exiting the port, navigating port channels, turning, and performing berthing and unberthing operations. When necessary, tugboats also engage in fire-fighting and rescue operations, icebreaking, and pollution control in port waters and channels. The number of tugboats and their towing power are typically determined based on experience, but these values are not always optimal.

1.2 Overview of Lithuanian Scientific Research on Ensuring Navigational Safety in Ports with Tugboats

Lithuanian researchers have conducted a variety of studies on port safety, particularly focusing on ship maneuverability and the use of port tugboats to enhance navigational safety. One line of research has focused on optimizing ship engines and other technical parameters to enhance the maneuverability of large vessels, ensuring their safe entry into ports under challenging conditions.

Studies have also explored tugboat operations during berthing and unberthing maneuvers, particularly in addressing external forces acting on vessels, such as wind and current, which can make operations more complex and hazardous (Paulauskas et al., 2008). Moreover, Lithuanian research emphasizes the importance of tugboats in preventing potential disasters by stabilizing vessels experiencing engine failure or navigation difficulties in port waters, ensuring they do not run aground or collide with other vessels.

1.3 Review of International Research on Navigational Safety in Ports with Tugboats

Tugboats are critical to ensuring navigational safety in ports worldwide, particularly during complex and challenging operations. International research has explored various methods for determining the optimal number of tugboats and the required towing power, emphasizing the need to account for environmental factors such as wind, currents, and shallow water.

Studies have also focused on the dynamic characteristics of tugboats and the design of their hulls, aiming to improve their maneuverability and safety during towing operations. Several port administrations worldwide have established rules and standards to ensure the safe operation of tugboats, particularly during high-risk maneuvers such as berthing and unberthing.

1.4 Analysis of Tugboat Operations in Ports

The main potential risks associated with port tugboat operations can be classified into technical and human factors. Technical risks include the incorrect application of towing methods, miscalculations of environmental conditions, poor maintenance of tugboats and their equipment, and the absence of towing plans. Human factors involve insufficient crew training, human error during operations, poor communication between the vessel and tugboat crew, and a lack of safety culture.

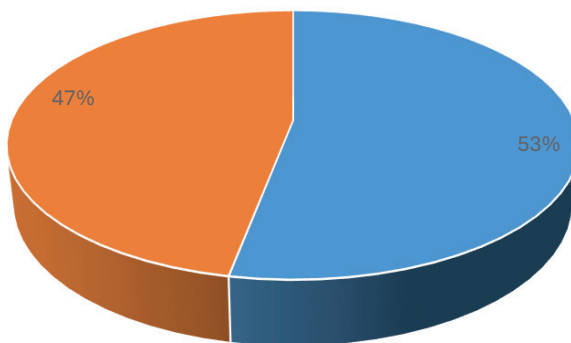


Fig. 1.1. Distribution of risk factors group which impact tug incidents in ports. Blue section – technical factor, orange section – human factor.

Technical factors: incorrect application of a towing method, miscalculated meteorological conditions, poor maintenance of tugboats, absence of towing planning, poor technical conditions of tugboats. Human factors: poorly trained tug crew, a human error during operation, poor communication between the tug crew and the pilot, bad working atmosphere.

Researchers from India have analyzed the most common risk factors affecting tugboat incidents in ports, identifying the frequency and distribution of such risks.

1.5 Summary of Chapter 1

Lithuanian and international researchers have conducted a significant amount of work on port safety, particularly in assessing the optimal number of tugboats and towing power needed during port operations. However, there is a lack of detailed studies evaluating tugboat towing power and their number under non-standard or extreme situations, such as adverse weather conditions, when factors like wind, current, and shallow water need to be considered.

Based on research into ship maneuverability models, simulations can be used to predict how different types of ships behave under varying conditions, which contributes to ensuring port safety. The results of these studies also provide valuable insights for port infrastructure development and tugboat captain training. Overall, research on tugboat maneuverability is critical for understanding and improving the safety of maritime navigation in ports, particularly under challenging conditions.

2. Theoretical Basis for Using Tugboats to Improve Navigational Safety in Ports

To ensure safety in ports, tugboats of various types and purposes are used, which significantly enhance the maneuverability of ships when navigating and maneuvering in port waters.

To determine the actual maneuvering parameters of a ship in port waters under shallow conditions, it is necessary to develop and verify, through experimental research, the maneuvering capabilities of ships using tugboats in real port conditions and with the help of a calibrated simulator. Experimental studies of ship maneuvering parameters under real conditions, when the ship is entering and maneuvering in the port with the assistance of tugboats, confirmed the reliability of the method developed by the dissertation's author.

In modern ports, multi-functional tugboats are used, capable of performing not only towing and pushing operations (assisting ships entering and exiting the port and assisting in berthing and unberthing under various conditions) but also handling other tasks, such as fire-fighting, rescue operations, icebreaking in the port's waters, and managing pollution. Due to the wide applicability of modern tugboats, specialized port service vessels are gradually being phased out. The combination of these functions increases the overall significance of tugboats in ensuring port safety.

2.1 The Theoretical Basis for the Methodology of Studying Tugboat Operations

In developing the research methodology, initial data collection, analysis, and situation evaluation were conducted. After reviewing available literature and scientific sources, the gathered and systematized information covered the novelty and safety challenges that tugboats face during operations. This included methods for selecting the optimal number of tugboats and the necessary towing power, as well as the impact of human factors in ensuring operational safety in the port.

The methodology was developed based on data from literary sources, observations of ship movements in ports, and theoretical and experimental results from tugboat-operating companies. The goal of this study is to create and present a methodology that accounts for challenging meteorological conditions, such as wind, currents, wave action, and the effects of shallow water, when determining the optimal number of tugboats and towing power needed for safe operations, including berthing and unberthing maneuvers and navigating the port's waters.

The developed methodology takes into account hydrometeorological and hydrological conditions (e.g., wind and current speeds and directions), vessel size, tugboat towing power, port depth, and other factors, which influence the tugboat's towing capacity and maneuvering operations.

2.2 Theoretical Method for Improving Ship Maneuverability with Tugboats, Based on the d'Alembert Principle of Forces and Moments

When a ship maneuvers in a port, particularly during berthing and unberthing operations, the forces acting on it can be divided as follows: the ship's inertia forces and moments generated when the ship is decelerating or accelerating; hydrodynamic forces and moments; "wing" hydrodynamic forces and moments (when the ship moves against the current or is stationary in a current); aerodynamic forces and moments; shallow water effects; and other factors.

The d'Alembert principle allows these acting forces and moments to be decomposed. When studying the interaction between tugboats and ships, both internal and external forces, which the tugboats must compensate for, are taken into consideration.

Based on the tugboat's functions, certain requirements must be met, such as:

- Maneuverability
- Power
- Shallow draft capability
- Ability to perform additional functions

Summary in English

The forces and moments created by the tugboats (denoted as X_{tug} , Y_{tug} , M_{tug}) can be calculated depending on the towing system (whether towing or pushing) and the fixed points where the towing lines are attached. In port conditions, with minimal or no wave action, the forces and moments generated by the tugboats to maintain the desired ship trajectory can be calculated.

$$X_{tug} = X_{in} + X_k + X_\beta + X_a + X_c + X_{sh} + X_T - X_p - X_N; \quad (2.32)$$

$$Y_{tug} = Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_a + Y_c + Y_{sh} + Y_T - Y_p - Y_N; \quad (2.33)$$

$$M_{tug} = M_{in} + M_k + M_\beta + M_a + M_c + M_{sh} + M_T - M_p - M_N \quad (2.34)$$

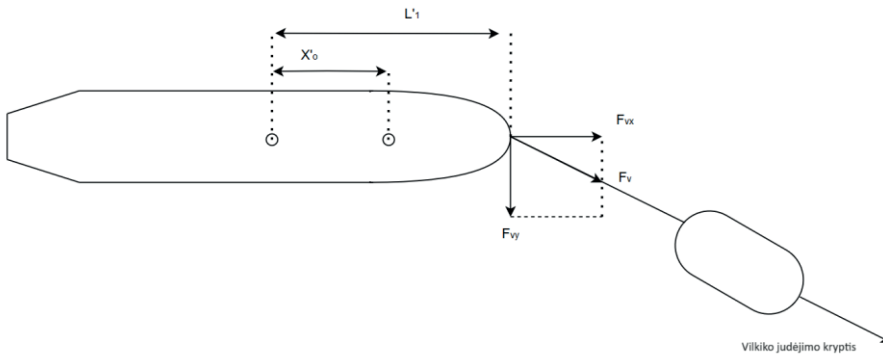


Fig 2.12. The scheme of the vessel moving direction and the tugboat with the forces acting on the tugboat maneuvering from the bow of a vessel

Using the provided methodology, it is possible to conduct a theoretical assessment of the ship's entry into and exit from the port, its maneuvering, berthing, and unberthing under complex conditions, as well as calculations to determine the minimum number of tugboats required and the necessary bollard pull for these operations.

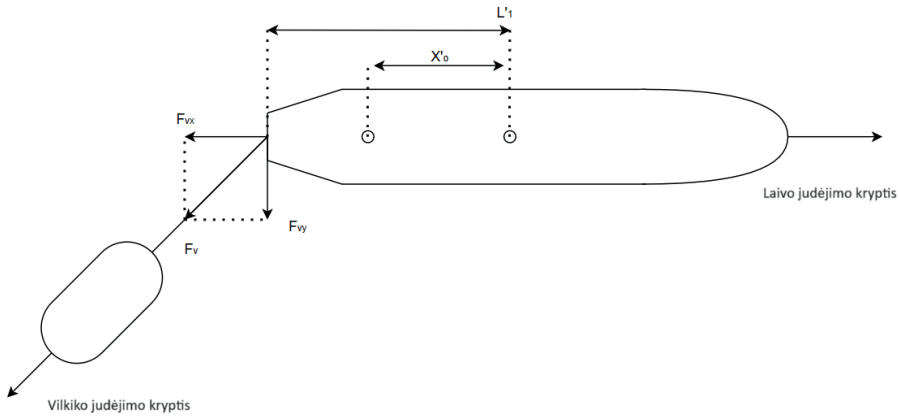


Fig. 2.13. The scheme of the vessel moving direction and the tugboat with the forces acting on the tugboat maneuvering from the stern of the vessel

Based on the presented methodology, theoretical assessments of a ship’s entry and exit, maneuvering, berthing, and unberthing in the port under challenging conditions can be performed, as well as calculations to determine the minimal towing force required by the tugboats. The theoretical calculations were validated using the “SimFlex Navigator” simulator.

2.3 Developing the Model and Principles for Calculating Tugboat Towing Forces

The greatest tugboat towing force is required when a ship moves laterally in port to ensure safe navigation. Therefore, it is essential to calculate the overall lateral towing force required, taking into account the ship’s resistance, aerodynamic forces (from wind), current forces, and the shallow water effect.

$$Y_{tug}^* = Y_{in} + Y_k + Y_\beta + Y_a + Y_c + Y_{sh} . \quad (2.42)$$

Using the developed mathematical model, the necessary tugboat towing power can be determined based on various factors, such as wind and current speeds and directions, as well as the ship’s characteristics. This model provides universal application for different ship types in any port by inputting the relevant parameters for each specific operation.

$$Y_{tug} = 1,5C \frac{\rho}{2} F_a v_y^2 (1 + 4,95 (\frac{T}{H})^2) + C_a \frac{\rho_1}{2} S_x v_a^2 \sin q_a + C \frac{\rho}{2} F_a v_c^2 \sin q_c, \quad (2.43)$$

The mathematical model incorporates the main forces acting on ships during berthing and unberthing, which affect maneuvering safety. It also includes factors such as the shallow water effect, the impact of current and wind direction, which were not considered in previous models. The model does not include wave effects or the wing effect, as these forces are relatively small during berthing and unberthing operations in port conditions, and there are no precise tools to measure their influence.

The created model is suitable for determining and evaluating the dynamic process as external forces change. For this purpose, the actual variation step is determined based on changes in the ship's position. As a result, the maximum required towing force of the tugboats is determined (see Figure 4.32).

Based on the derived mathematical model, methodological guidelines have been prepared on how to calculate the optimal number of tugboats and the towing scheme, given the overall towing force required for the operation.

The methodological basis for selecting the optimal number of tugboats (following the steps below) based on the maximum towing force:

1. Calculate the total required towing force of the tugboats using the mathematical model (Formula 2.43).
2. Select the tugboat scheme (in most cases, one tugboat at the bow and another at the stern).
3. Use no more than 75-80% of the tugboats' nominal towing power, or increase the result obtained from Formula 2.43 by 20-25%.
4. Based on the calculated required towing force, select the optimal number of tugboats according to the available tugboat capacity in the port.
5. Use the following data for calculations:
 - The ship's geometric parameters from the ship registry.
 - Wind and current direction and speed from the port's hydrometeorological station.
 - Depth parameters from port data.

By applying the developed mathematical model, the necessary tugboat towing force for unberthing or berthing ships can be determined. The mathematical model is universal and can be applied to any type of ship in any port, by inputting the relevant variables and considering the conditions of the operation. This type of mathematical model can be conveniently converted into a spreadsheet, with the appropriate variables.

2.4 Methodology for Calculating Towing Line Tension

Ship movements are calculated using vector methods, involving both vector and scalar quantities, such as various forces and physical interactions. This approach can be used for various purposes, including predicting a ship's trajectory or estimating the tension in towing lines during maneuvers. The dissertation uses a vector-based method to calculate towing line tension, recognizing that the vertical and horizontal angles of the towing line can significantly increase the tension compared to the horizontal forces acting on the ship.

Lagrange interpolation was used to create a mathematical model to estimate the dynamic behavior of a ship during towing, considering the ship's mass, inertia, and the elasticity and damping coefficients of the towing line.

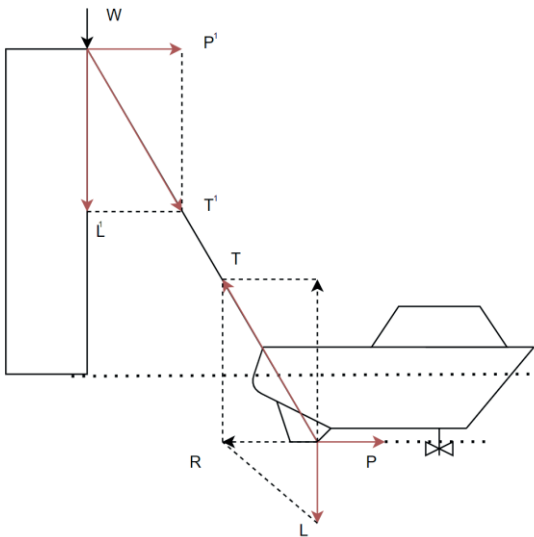


Fig. 2.15. The tugboat's effective bollard pull force when the towing line fixing point is high

By using the vector method, it is possible to assess the tension in towing lines during towing operations, especially under extreme conditions when the towing line could be damaged, such as snapping, which could lead to an emergency situation during the operation. Additionally, the vector method is universal and allows for evaluating the dynamics of the towing system when tugboats assist a ship in unberthing from or berthing to a quay, making a turn, or navigating through a channel.

2.5 Accuracy Assessment Methodology for the Research

To evaluate the accuracy of the calculations and experimental results obtained from real ships and the calibrated simulator, the Maximum Distribution Method (also known as the Maximum Entropy Method) was applied. This statistical method is used to establish probability distributions based on limited data.

By using this method, the study was able to assess the accuracy of the results obtained from the experiments and simulations. These results were compared to real-world scenarios to ensure the effectiveness of the developed methodology in determining the required number of tugboats and their towing power for safe port operations.

$$F'_v = F_{v\ vid} + P' \cdot k_n \cdot R_n . \quad (2.51)$$

$$P' = 1 - 68,3\%; 2 - 95,3\%; 3 - 99,7\% \quad (2.52)$$

$$k_n = 3 - 0,55; 4 - 0,47; 5 - 0,43; 6 - 0,396; 7 - 0,37; 8 - 0,351; 9 - 0,337; 10 - 0,329; 11 - 0,325; 12 - 0,322, \quad (2.53)$$

These values likely describe confidence intervals or levels of certainty in the measurements used for safety calculations in maritime navigation, particularly in difficult or dangerous conditions like when handling LNG tankers. This indicates that the more data is available, the smaller the adjustment needed, reflecting increased certainty in the measurements.

These elements are important for accurately estimating the forces required for safe operations in port, such as tugging large ships, which ensures both operational efficiency and safety under different meteorological and hydrological conditions.

2.6 Chapter Summary

The theoretical foundation of this study is based on hydrodynamic and ship dynamics principles, which describe how forces and moments act on a ship's hull. The developed mathematical model helps evaluate complex navigational conditions (e.g., wind and current speeds and shallow water effects) and more accurately determine the necessary towing and line tension forces.

This chapter presents mathematical expressions that can be used to analyze and optimize tugboat parameters to improve ship controllability and maneuverability. The model integrates two methods: the d'Alembert principle of forces and moments and

the vector calculation method. The combination of these methods allows for comprehensive analysis and accurate calculation of the forces acting during towing operations, improving the navigational safety of ships in port waters.

3. Experimental and Simulation Research Methodologies

Conducting a scientific experiment using the described research methods and procedures aims to investigate the impact of tugs, various types of ships, different wind directions and strengths as well as the current on operations. The experiment was conducted with tugs performing towing operations, where data were collected during these operations and later compared with simulator results in the laboratory. The purpose of the experiment is to confirm or refute the scientific hypothesis and mathematical models based on observations and data collected under controlled conditions, i.e., by recording towing parameters while tugs perform actual towing operations, and refining the research through simulations, using them as calibration tools. Simulator research is used to select towing schemes under given experimental conditions.

The experimental results are collected, processed, and presented in tables and diagrams, compared and evaluated for errors. Based on the research results, conclusions and recommendations are formulated on the safe navigation of ships during towing operations.

3.1. Measuring Equipment and Methodology for Experiments Conducted with Tugs

When preparing to conduct an experiment on a working tug in the port, it is important to assess all potential constraints that could hinder the achievement of the goal:

- Safety challenges when recording results on the ship – work under unfavorable meteorological conditions can complicate the recording of results;
- The impact of the human factor when recording results – a lack of knowledge on how to operate measuring equipment.

When conducting the research, it is important to properly prepare an action plan on how and when the results will be recorded, as the experiment is conducted during actual towing operations under various meteorological conditions in the port. Therefore, preparation for work on the ship, at sea, or in the port waters, is especially important to safely conduct the experiment and record all necessary results – this is a mandatory condition.



Fig. 3.3. Tugboat control room

During the experimental research and verification of the developed methodology for calculating the number of tugs and their towing force, highly accurate navigation equipment, ship simulators, and onboard positioning and movement parameter recording equipment were used. The measuring and parameter recording equipment was selected based on the research results and the data to be collected. The following data were recorded:

- Towing line tension;
- Engine power;
- Propeller revolutions;
- Wind speed and direction;
- Current parameters.

Some of the experimental parameters were recorded using the equipment available on the tugs, which is used in their daily work.

Table 3.2. Tugboat technical parameters

| Tugboat type | Length (LOA) | Width | Draft | Engine power | Towing force |
|---------------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|
| ASD | 29.44 m | 10.1 m | 4.6 m | 3370 kW | 55 T (550 kN) |

The tug's control bridge is designed and equipped to allow a single person to perform the main ship control functions. The entire crew consists of three people: the captain, the mechanic, and the deckhand. The tug is controlled by two joysticks that regulate engine power and propeller direction. The tug is of the ASD type (Azimuth Stern Drive), meaning that the azimuth-type propellers are installed at the stern and can rotate 360 degrees. The control bridge is equipped with all the necessary equipment to monitor and record the tug's operating parameters and safely navigate in the port and its approaches.

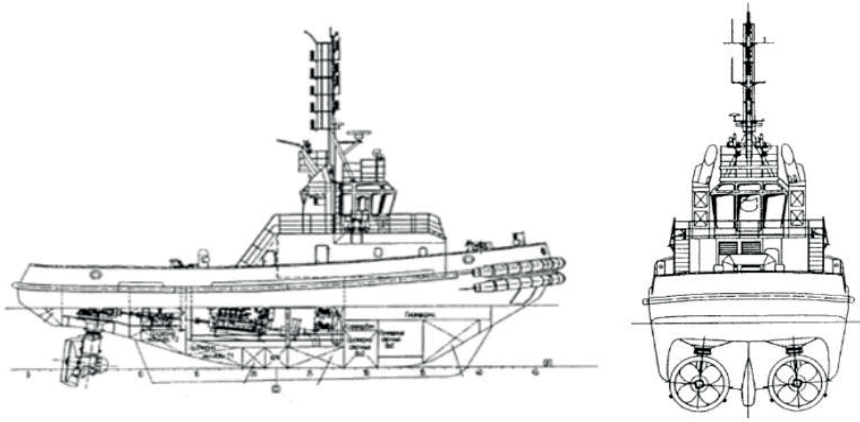


Fig. 3.9. The ASD type tug scheme

When conducting research on real ships visiting the Port of Klaipėda, they can be divided into two groups: data were collected on ships that regularly visit the Port of Klaipėda and on irregular, occasional ships that happened to be in the Port of Klaipėda during the days of the study and for which specific towing operations were planned. Tugs assisted the ships in maneuvering within the port waters, berthing, and unberthing.

The data were recorded under the meteorological conditions prevailing on that day, which influenced the results of the studies. Table 3.4. presents the main parameters of the ships regularly visiting the Port of Klaipėda that participated in the experimental studies. By observing the parameters of the towing operations for these ships under various meteorological conditions, their accuracy in execution could be evaluated and compared.

The conditions of the tests, when the research was carried out in real circumstances where tugs performed towing operations and assisted ships in maneuvering, were difficult to predict – it was impossible to foresee what the conditions would be at the time of the study, as the meteorological conditions in the port or at its approaches can change very quickly. Therefore, actual hydrometeorological parameters, measured using the equipment on the tugs, were used.

Table 3.4. Experimental vessels parameters

| Ex-periment number | Vessel type | Length (LOA), m | Width, m | Draft, m | DWT, T | Gross tonnage, T |
|--------------------|------------------------------------|-----------------|----------|----------|---------|------------------|
| 1 | LNG “Isabella” | 294.9 | 46.4 | 10.8 | 93 080 | 115 405 |
| 2 | LNG “Arctic Voyager” | 289.5 | 48.5 | 10.3 | 75 434 | 118 571 |
| 3 | Bulker carrier “Alanya M” | 186.5 | 30.0 | 11 | 41 327 | 25 065 |
| 4 | Bulker carrier “Ece Nur Bayraktar” | 196 | 32 | 12.5 | 58 449 | 34 422 |
| 5 | Container ship OOCL RAUMA | 168 | 27 | 8.5 | 17 892 | 17 488 |
| 6 | LNG “Maran GAS ULYSSES” | 290 | 46 | 11.7 | 92 621 | 113 502 |
| 7 | Chemical tanker “Lagertha” | 161 | 22 | 7 | 19 999 | 12 619 |
| 8 | Crude oil tanker KIISLA | 139 | 22 | 8.9 | 14 750 | 9910 |
| 9 | Crude oil tanker SKS DODA | 259 | 45 | 8.5 | 119 456 | 65 911 |
| 10 | Container ship “Sparrow” | 238 | 39 | 9.1 | 69 890 | 64 500 |
| 11 | Chemical tanker “Stn Nordic” | 144 | 23 | 6.5 | 16 657 | 11 943 |

The data collected under different towing schemes and meteorological conditions were used for comparative studies, verifying the efficiency and accuracy of the mathematical model. After summarizing the results obtained, methodological recommendations were provided.

3.2. Measuring Equipment and Methodology for Experiments Conducted on a Simulator

The “SimFlex Navigator” simulator models port parameters and investigates ship navigation and tug operation under limiting conditions. Visual ship bridge simulators “SimFlex Navigator” and “SimFlex 4” are calibrated based on actual ships and are used to recreate various conditions in the port and to investigate the maneuvering capabilities of ships and the compatibility of port infrastructure. The simulator allows the creation of different scenarios for ship maneuvering, port infrastructure parameters, and hydrodynamic effects.



Fig. 3.11. Simulator “SimFlex Navigator” (author’s photo)

The simulator provides 3D and 2D images of the areas being studied. The equipment collects ship, tug, and environmental parameters, assessing ship speed, angular rotation speed, tug line tension, clearance under the ship’s keel, superstructure projection areas, and other parameters. The data provided by the simulator is accurate and allows for comparative studies with real experiments.

3.3. Summary of the Chapter

After conducting experimental research, the information necessary for validating the mathematical modeling was collected. Experiments were conducted on actual tugs and using the calibrated simulator, allowing for the identification of experimental limits and refinement of the mathematical model to effectively predict ship maneuvering capabilities and ensure navigational safety in the port.

The results obtained from the simulator confirmed the importance of tugs in ensuring navigational safety in the port and supported the need for the methodology to select the optimal number of tugs and their towing force. Experimental and comparative research results indicate that a properly selected number of tugs and their towing force are directly related to the safety of ships in the port. Inadequately assessed situations increase the risk of accidents, while overestimating the requirements leads to unnecessary costs and environmental impact.

4. Theoretical and Experimental Research Results and Their Application to Ensure Navigational Safety in the Port

Comparative research on theoretical and experimental results is a method used to evaluate how well the theoretical model matches the real situation. For example, in this case, data were collected from real operational systems involving ships and

tugs, which were then supplemented with theoretical mathematical model calculations. Comparative research assesses theoretical models by testing their effectiveness and determining their correspondence with real conditions to approve the mathematical model. The dissertation includes a statistical analysis to identify the deviations in research results, assessing how well the theoretical model results align with the actual outcomes, and summarizes and compares the findings.

A summary was prepared that presents the main conclusions of the research, encompassing the strengths and weaknesses of the theoretical models, proposals for future research, and how the research results can be applied to ensure navigational safety in the port.

4.1 Experimental Research Results

Eleven experimental test results were collected under various conditions while servicing different types and lengths of ships. The following key parameters were recorded: ship geometry, wind speed, wind direction, tug engine revolutions, engine power used, towing line length, and towing line tension. The main goal of the practical tests (experiments) was to compare the collected data with the theoretical mathematical model developed by the author of the dissertation, to verify its reliability and accuracy. Several test results are presented in the dissertation in the form of graphs and diagrams, detailing the test results and revealing the course of the research and its characteristics.

Table 4.1. Experimental results

| Experiment number according to Table 3.4. | Wind speed | Wind direction | Current speed | Current direction | Engine power during operation | Towing line length | Towing line tension during operation |
|---|------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 1 | 8 m/s | 335 (NW) | 0.3 m/s | To the sea | 70 % | 62 m | 45 T (450 kN) |
| 2 | 6 m/s | 335 (NW) | 0.3 m/s | To the sea | 50 % | 40 m | 35 T (300 kN) |
| 3 | 5 m/s | 335 (NW) | 0.2 m/s | To the sea | 70 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 4 | 5 m/s | 270 (W) | 0.2 m/s | From the sea | 50 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 5 | 8 m/s | 335 (NW) | 0.3 m/s | To the sea | 50 % | 62 m | 45 T (450 kN) |
| 6 | 10 m/s | 270 (W) | 0.5 m/s | From the sea | 90 % | 40 m | 50 T (500 kN) |
| 7 | 10 m/s | 335 (NW) | 0.5 m/s | To the sea | 70 % | 35 m | 45 T (450 kN) |
| 8 | 12 m/s | 360 (N) | 0.5 m/s | From the sea | 90 % | 55 m | 50 T (500 kN) |
| 9 | 12 m/s | 360 (N) | 0.5 m/s | From the sea | 70 % | 37 m | 45 T (450 kN) |
| 10 | 9 m/s | 135 (SW) | 0.3 m/s | To the sea | 50 % | 28 m | 40 T (400 kN) |
| 11 | 10 m/s | 335 (NW) | 0.3 m/s | To the sea | 50 % | 45 m | 40 T (300 kN) |

The results obtained using the maximum distribution method were used to calculate the error margin of the results. The tension results of the towing lines were compared with the experimental research data, and a calibration coefficient was derived, which was used to compare the results obtained during the experiment, mathematical modeling, and simulation research.

4.2. Simulation Research Results

To evaluate the methodology for determining the number of tugs and their towing force, developed by the author of the dissertation, and its applicability in the port, research was conducted with real ships and a calibrated simulator. The research results are discussed in this section.

When studying tug operations in ports, the dissertation further examines the impact of external factors (wind, current, shallow water) on towing operations under challenging and limiting port conditions. A ship ($L = 238$ m) was selected for comprehensive research, and its parameters are presented in Table 4.4. The comparative research was conducted based on the results from the real tug operations.

The comparative results of the data are presented in Table 4.4., and these were used to calibrate the simulator based on theoretical methods. This table presents the comparative research results.

Table 4.4. Comparative results of the experimental and simulation study of towing line tension forces (in tons)

| Experiment number | Wind speed | Wind direction | Towing line tension in a tug | Towing line tension in a simulator | Calibration coefficient |
|-------------------|------------|----------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 8 m/s | 335 (NW) | 45 T | 43 T (430 kN) | 1.05 |
| 2 | 6 m/s | 335 (NW) | 35 T | 30 T (300 kN) | 1.16 |
| 3 | 5 m/s | 335 (NW) | 40 T | 40 T (400 kN) | 1 |
| 4 | 5 m/s | 270 (W) | 40 T | 41 T (410 kN) | 0.98 |
| 5 | 8 m/s | 335 (NW) | 45 T | 43 T (430 kN) | 1.05 |
| 6 | 10 m/s | 270 (W) | 50 T | 48 T (480 kN) | 1.04 |
| 7 | 10 m/s | 335 (NW) | 45 T | 46 T (460 kN) | 0.98 |
| 8 | 12 m/s | 360 (N) | 50 T | 52 T (520 kN) | 0.96 |
| 9 | 12 m/s | 360 (N) | 45 T | 45 T (450 kN) | 1 |
| 10 | 9 m/s | 135 (SE) | 40 T | 41 T (410 kN) | 0.98 |

The results obtained and their comparison led to the development of the final mathematical model (Equation 2.46), which is based on the results of the conducted research, enabling an effective evaluation of the necessary towing force for tugs under different meteorological conditions.

Summary in English

The simulation study results were used as a calibration tool to replicate the real situation as accurately as possible. The simulator applies the previously developed mathematical models, but as specific real towing operation parameters change, the mathematical models can be refined to better match actual situations. Alternatively, calibration is used as a refinement tool to check how well the simulator prepared for a specific situation aligns with real-world factors.



Fig. 4.10. Navigation situation at quay No. 127

Taking into account the local conditions, tugs worked in towing and pulling-pushing mode. Near other berths, when leaving the maneuvering zone (bay), a POST PANAMAX cargo ship (bulk carrier) and a ferry were berthed nearby (Figure 4.11.).

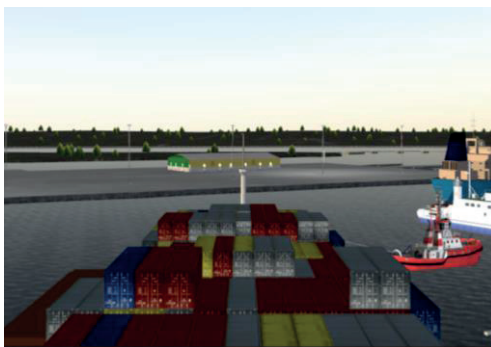


Fig 4.11. Visualization of the situation before unmooring

The characteristics of the fenders and local requirements were considered when calculating. The following conditions were selected: no wave action or current, wind speed up to 14 m/s from various directions, and the maneuvering systems of the towed

vessel were not used, despite the very low speed of the vessel. Based on the results of the tests conducted on a real ship, considering the aforementioned characteristics and applied conditions, calibration coefficients were adjusted, and equations (2.32)–(2.34) were refined, and the simulator results were obtained.

The ship's and tug's position trajectories show that the tug's assistance leads to a positive result: the ship can be controlled under similar conditions and avoid grounding (left side of Figure 4.21.). With the help of the tug, the ship reached the port's turning basin, where it can safely anchor while waiting for assistance from other tugs to tow.

4.3 Summary of Experimental and Comparative Research Results. Application of the Results to Ensure Port Navigational Safety

The collected research data can be represented in graphs to determine the necessary tug pulling force for ships of different lengths (ship length is considered one of the main factors when ordering a specific number of tugs in the port), taking into account wind speed and direction.

For the selected ship ($L = 238$ m), the forces created by the wind (calculated using the methodology developed by the author of the dissertation) are presented in graphs based on wind speed and direction. Using the developed methodology, the optimal number of tugs and pulling force for the ship with a length of $L = 238$ m is determined by analyzing the situation in a specific port area. Additionally, the most unfavorable wind direction and speed, where the required pulling force increases for towing operations, have been identified. The obtained results are shown in Figure 4.22.

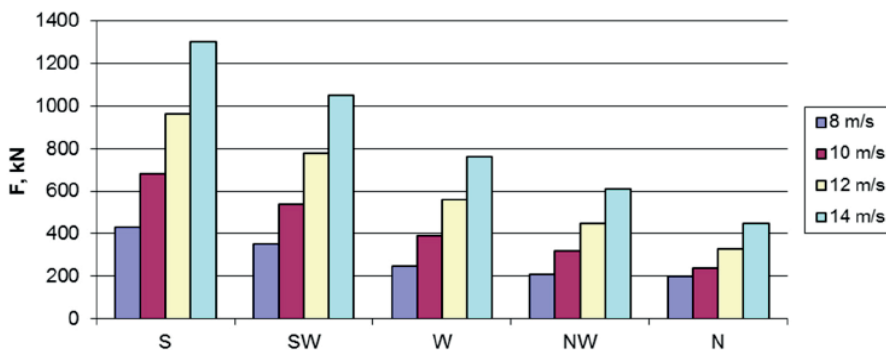


Fig. 4.22. The required pulling power of the tug(s) for the ship ($L = 238$ m) depending on the wind direction and speed (S – south, SW – southwest, W – west, NW – northwest, N – north)

Summary in English

Detailed research of the specified situations was conducted using the formula from section 2.43, and a calculation program was developed for the required tug pulling force under different port conditions. This program is straightforward and does not require special or additional ship data, making it easily adaptable for use in any port. The calculation results for different scenarios are presented in Figure 4.32.

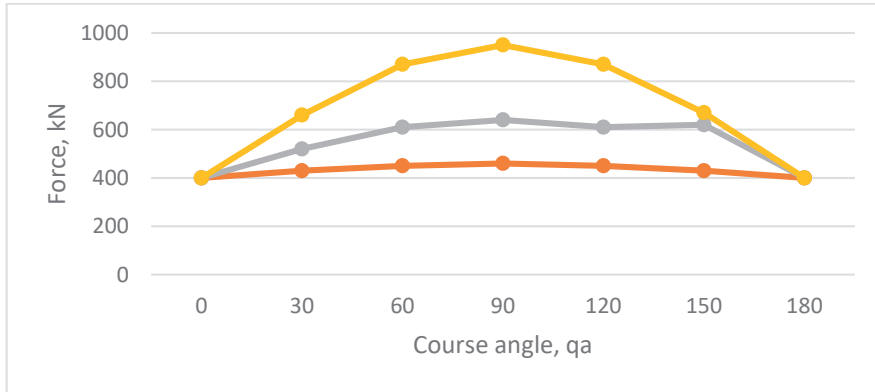


Fig. 4.32. The required pulling force of tugs under different course angles and meteorological conditions. Calculations were made for a dry cargo ship with $S_x = 3500$, current speed $V_c = 0.5$ m/s, depth $H = 14.5$ m, draft $T = 10$ m. Red line – kN if wind is 5 m/s, grey line – kN if wind is 10 m/s, yellow line – kN if wind is 15 m/s,

Providing the research results to tug companies, ship managers, and captains should simplify the decision-making process when different ships of varying lengths and sizes are affected by wind and current of different directions and speeds. Properly assessing prevailing meteorological and natural conditions ensures navigational safety in the port. It is important to note that improper risk assessment and incorrect selection of the required tug pulling force can lead to incidents and accidents.

4.4 Chapter Summary

The research data reveal the impact of wind speed, direction, and shallow water effects on ship maneuvering in the port, particularly during berthing and unberthing operations. The research results show that the influence of meteorological and hydro-meteorological conditions on calculating the necessary tug pulling force is significant.

When maneuvering in the port, under the same wind and current conditions, changes in the impact of these forces on the ship's hull can increase the required tug pulling force by up to 15%. Therefore, accurate assessment of the maximum required pulling force during towing operations ensures navigational safety when maneuvering

ships in the port. The effect of current, wind speed and direction, and shallow water is not the same for ships of different types and lengths. Thus, using a mathematical model that evaluates ship parameters and the effect of acting forces, and accordingly determines the required tug pulling force, allows for more accurate calculations of the maximum necessary force for towing operations. This contributes to ensuring navigational safety in the port when proper consideration of meteorological and hydrological conditions, as well as the ship's size, allows for the precise selection of the required tug pulling force and the number of tugs, as well as the appropriate towing scheme.

5. Conclusions

1. After examining the justification of tugboat use in ports to ensure navigational safety, it has been established that under non-standard (borderline) conditions, due to insufficient research, the use of tugboats is not always effective, which increases the likelihood of accidents. Therefore, scientific research on the use of tugboats in ports to ensure navigational safety is particularly important.

2. Analyzing how tugboats are used in ports, it has been found that their maximum pulling force is used for short periods (during berthing and unberthing operations, and occasionally when turning ships). That is, the maximum pulling force is applied for up to 10–12 minutes, but it is crucial to calculate the necessary tugboat pulling force (or maneuvering equipment, if available on the ship) in advance to prevent accidents.

3. The new method developed by the dissertation author for calculating the tugboat pulling force and towing line tension allows for the advance and accurate determination of the required tugboat pulling force, as well as the number of tugboats needed for ships with specific parameters in specific environmental conditions.

4. The results of theoretical and experimental studies conducted in the complex areas of Klaipėda Port (berths No. 67a, 72, and other challenging locations), ensuring reliability (calculation errors did not exceed 10% of the obtained calculated values), allow for accurate determination of the necessary tugboat pulling force and reasonable decisions regarding the number of tugboats and their pulling force, thereby minimizing the likelihood of accidents.

5. The developed method for calculating the number of tugboats, their pulling force, and towing line tension can be adapted and applied in any port, which will enhance maritime safety, especially under borderline conditions.

Klaipėdos universiteto leidykla

Martynas SIMUTIS

RACIONALUS VILKIKŲ PANAUDOJIMAS SUDĖTINGOMIS NAVIGACINĖMIS SĄLYGOMIS
LAIVYBOS SAUGUMUI UOSTUOSE GERINTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (T 003)

RESEARCH ON THE RATIONAL USE OF TUGS IN DIFFICULT NAVIGATION CONDITIONS,
INCREASING SHIPPING SAFETY IN PORTS

Doctoral dissertation

Technological sciences,
Transport Engineering (T 003)

Klaipėda, 2025

SL 1335. 2025 01 09. Apimtis 15,98 sąl. sp. I. Tiražas 20 egz.
Klaipėdos universiteto leidykla, Herkaus Manto g. 84, 92294 Klaipėda
Tel. (8 46) 398 891, el. paštas: leidykla@ku.lt, interneto adresas: <http://www.ku.lt/leidykla/>
Spausdino UAB „Vitaė Litera“, Savanorių pr. 137, 44146 Kaunas