

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas EGLYNAS

JŪRINIAME INTERMODALINIAME
TERMINALE NAUDOJAMŲ IŠMANIŲJŲ
KROVOS TECHNOLOGIJŲ KŪRIMAS IR
TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2017

Disertacija rengta 2012–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVICĪUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVICĪUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

dr. Rolandas MAKARAS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

habil. dr. Dariusz MAZURKIEWICZ (Liublino technologijos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

doc. dr. Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

doc. dr. Dainius UDRIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerijos – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. vasario 10 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. sausio 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lietuva), Aleksandro Stulginskio (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r.) bibliotekose.

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-002-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-997-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017

© Tomas Eglynas, 2017

tmse@inbox.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas EGLYNAS

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF
SMART CARGO TECHNOLOGIES FOR
MARITIME INTERMODAL TERMINAL

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2017.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Marijonas BOGDEVICĪUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVICĪUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Dr Rolandas MAKARAS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Dr Habil. Dariusz MAZURKIEWICZ (Lublin University of Technology, Mechanical Engineering – 09T),

Assoc. Prof. Dr Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Assoc. Prof. Dr Dainius UDRIS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 10 February 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.
Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 9 January 2017.
A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), Klaipėda University (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lietuva), Aleksandras Stulginskis University (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r.).

Reziუმė

Disertacijoje sumanaus krantinės kranu nauja samprata yra tiesiogiai siejama su išmanaus konteinerio ir autonominio konteinerių vežėjo koncepcijų diegimu uostuose. Autonominio uosto vizijoje, artėjant krantinės kranu griebtuvui prie konteinerio, radijo dažniu atpažinimo (RDA) technologija užkoduota informacija apie kroviniu atsparumą perkrovai privalės būti tiesiogiai perduodama kranu valdymo sistemai. Apdoroti duomenys leis generuoti kiekvienam konteineriui individualizuotus sparčius ir saugius perkrovos režimus, atsižvelgiant į vėjo ir laivo sukeltus svyravimus ir t. t. Didžiųjų krantinės kranu griebtuvo įvairiakrypčius svyravimus slopinančios sumanosios valdymo sistemos sukūrimas tampa vienu iš pagrindinių disertacijos uždavinių. Toks intelektinio transporto uždavinys yra sprendžiamas sukuriant krantinės kranu laboratorinį prototipą ir jam pritaikytus matematinis ir valdymo sistemą imituojančius modelius, praktikoje taikant profiline valdymą, realizuojamą proporcinium (P), integruojančiu (I) ir diferencijuojančiu (D) valdikliu (PID). Pabrėžtina, kad taikant PID valdiklį sistemose, kuriose pagrindinis transportuojamas objektas – konteineris kuris kabo ant ilgų lynų, gaunamos nemažos paklaidos. Disertacijoje sukurta virtuali sistemos skaitinio modeliavimo aplinka, kurios rezultatai patikrinti eksperimentu, tam panaudojant suprojektuotą ir pagamintą realaus krantinės kranu laboratorinį prototipą.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų sąrašai bei santrauka anglų kalba. Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Aptarti žinomi konteinerio perkrovos laivas–krantinė matematiniai modeliai ir jais grindžiami sistemos valdymo algoritmai. Antrajame skyriuje aprašomi krantinės kranu kėlimo mechanizmo matematiniai modeliai bei pateikiama diferencinių lygčių sistema skirta krantinės kranu kėlimo mechanizmo ir griebtuvo su kroviniu sukeliamų svyravimų skaitiniam modeliavimui ir įtakos krovai vertinimui. Trečiajame skyriuje, apibendrinus virtualaus modeliavimo išvadas, projektuojamas ir sukuriamas krantinės kranu laboratorinis prototipas valdymo algoritmų eksperimentams tyrimams atlikti. Taip pat aprašomas sukurtas valdymo algoritmas su svyravimų kompensavimo grandimi. Disertacija baigiama tyrimą apibendrinančiomis išvadomis.

Disertacijos tema paskelbta 11 straipsnių: vienas – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą, du – tarptautiniuose recenzuojamuose mokslo leidiniuose, 8 Lietuvoje bei kitose šalyse vykusių konferencijų leidiniuose.

Abstract

The new smart quay crane new concept is directly related to the intelligent container and autonomous container carrier concepts. In a vision of autonomous port, while the quay crane spreader approaches to the container at the ship, information about container and cargo resistance must be passed directly to the supercomputers of carrier using radio frequency identification (RFID) technology. Obtained data processing will allow to generate customized fastest and safest specific handling mode for each container, depending on causes of wind, swinging caused by ship movement and etc. The main objectives of the thesis becomes dependency to reduce container sway at quay cranes, by developing the intelligent control system. The intelligent transport problem is solved by developing a quay crane laboratory scaled prototype and adapted mathematical and control system models, using the motion profile based control algorithm implemented with proportional (P), integrative (I) and differentiating (D) controller (PID controller). It should be noted that the PID controller systems were container is the main handling object, which hang on spreader suspended with long ropes, generates significant errors. Dissertation includes developing of a numerical modelling environment for the new system, which results are verified by an experiment, using designed and constructed real-quay crane laboratory prototype.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, references, list of author's publications and summary. The introduction chapter reveals the investigated problem, describing the object of research aim and tasks, describes the research methodology, scientific novelty, the practical significance of the results, defended statements. The first chapter is devoted to a review of the literature. The most researched quay crane mathematical models and its control algorithms for transportation "ship-to-shore" are discussed. The second chapter describes the mathematical modeling task of quay crane spreader with lifting mechanism and presents a system of differential equations for quay crane is created that takes into account the fluctuations and dynamic properties which affect cargo overload evaluation. The third chapter summarize the findings from virtual simulation, from the designed and created quay crane experimental laboratory prototype with developed control algorithms. Also the control algorithm with sway compensation subsystem are presented. Experimental studies are discussed.

The dissertation concludes with general conclusions.

There are 11 articles published on dissertation topic – one article included in the Thomson ISI list, two – in international peer-reviewed scientific journals, 8 at issues of national and international conferences.

Sąvokos ir žymėjimai

Sąvokos

Arduino mirkovaldiklio modeliavimo plokštė – Atvirojo kodo modeliavimo platforma sukurta mikrovaldiklio pagrindu ir skirta kurti skaitmeninius įrenginius skirtus fizinių įrenginių stebėjimui ir valdymui.

Ekspirimentinė patikra – teorinių rezultatų ar prielaidų patikrinimas praktiškai (ta pati veiksmų seka atliekama laboratoriniame prototipe esant toms pačioms sąlygomis).

Generavimas – duomenų bazės sukūrimas, apimantis duomenų rinkinio sudarymą, formavimą ir įkrovimą, duomenų laikmenos iniciaciją, duomenų bazės žodyno sudarymą.

Individualizuotas krovinys – jūrinis intermodalinis konteineris su jame integruota, duomenų rinkimo ir stebėjimo, sistema, turinčia unikalų numerį, kuris naudojamas kaip identifikatorius bendroje valdymo sistemoje.

Individualizuoto krovinio transportavimo charakteristikos – individualaus konteinerio parametrai ir specifiniai reikalavimai jo perkrovai, bendroje valdymo sistemoje.

Integruota funkcija – atskira sistemos dalis prijungta prie bendros valdymo sistemos išlaikant jos pirmines savybes (taip valdymo sistemą papildant funkcionalumu).

Koncepcijos integravimas – idėjos ar jos dalies įgyvendinimas sujungiant su kita idėja ir išlaikant jos pradinę reikšmę.

Koncepcinis pavidalas (modelis) – idėjos, proceso, funkcijų ar įrenginio samprata pateikta supaprastintame pavidale (brėžinyje, diagramoje ar kt.).

Krantinės kranas – angl. *quay crane*, specialios konstrukcijos konteinerių krovai pritaikytas kranas skirtas krauti iš laivo į krantą ir atvirkščiai, naudojamas konteinerių terminaluose ir yra statomas ant krantinės.

Krantinės krano prototipas – kaip ir laboratorinis kranos makete, tam tikrų kranos funkcijų ar valdymo sistemų atkartojimas, laboratorinėmis sąlygomis sukuriant mažesnio mastelio kranos fizinį modelį ir jo valdymo sistemą.

Krovos efektyvumas – konteinerio krovos proceso „laivas–krantas“ trukmės, vertinimas lyginant pirminius rezultatus su naujai gautais rezultatais (krovos trukmės minimizavimas lyginant su egzistuojančiomis krovų trukmėmis).

Kvadratinio nuokrypio integralinis rodiklis – suminės kvadratinės paklaidos minimali vertė.

Laboratorinis krano maketas (modelis) – Tam tikrų krano funkcijų ar valdymo sistemų atkartojimas, laboratorinėmis sąlygomis sukuriant mažesnio mastelio krano fizinį modelį ir jo valdymo sistemą.

Nepertraukiamą konteinerių perkrovą – konteinerių krova cikle „laivas–krantas–laivas“, vykdoma nepertraukiamai (visuose ciklo krovos procedūrose užtikrinant vientisą konteinerio krova).

Pavyzdinis žaliasis uostas – tvarus, aplinkai draugiškas (ekologiškas), ekonomiškai tvarusnis ir efektyvesnis uostas, kuris dėl veikiančių (ekologiją skatinančių) logistinių grandinių ir ilgalaikės autonomiškumo plėtros strategijos, laikomas pavyzdžių kitiems regioniniams ir ES uostams.

Posistemės – (angl. *subsystem*) nepriklausoma sistemos dalis atlakanti svarbią užduotį, bendroje valdymo sistemoje siekiant to paties tikslo.

Registravimas – stebimų reiškinų ypatybių užrašymas.

S-formos greičio kitimo profilis (S-profilis) – Užduoties signalo formavimo technika, kurioje iš anksto planuojamos vežimėlio ir griebtuvo judėjimo charakteristikos (vežimėlio judėjimo greitis tam tikru laiko momentu – rezultate išgaunant S-formos greičio kitimo kreivę).

Sintezės algoritmai – objekto dalių ar savybių jungimas į vieną visumą naujai kokybei gauti, visumos iš jungiamų elementų kūrimo algoritmas ar procesas, kuriame yra pagal griežtas taisykles atliekamų operacijų (skaičiavimų) seka, kurios laikantis sprendžiama ta ar kita matematikos arba logikos uždavinių klasė.

Suglaudinta koncepcija – keletas atskirų koncepcinių idėjų sujungimas, atsisakant tam tikro nederančių idėjos fragmentų, siekiant bendro tikslo.

Svyravimų kompensavimas – atsiradusių krovinio svyravimų mažinimas programinėmis priemonėmis.

Transportavimo mazgas – tam tikra transportavimo logistinės grandinės dalis, kurioje vyksta konteinerio perkrovos procedūros.

Trapecinio greičio kitimo profilis – kaip ir S-profilio atveju, tačiau laike planuojami judėjimo greičiai, kurie formuoja trapeciją).

Vizualinis stebėjimas (organoleptinis tyrimas) – eksperimentinis tyrimas grindžiamas žmogaus jutimo organais (disertacijos atveju: regos, klausos). Analizuojant šiuos pojūčius pagal turimą patirtį, ir vertinama atitinkamais pasirinktais matavimo vienetais.

Žaliasis uostas – tvarus, aplinkai draugiškas (ekologiškas) uostas, ekonomiškai tvarusnis ir efektyvesnis dėl veikiančių (ekologiją skatinančių) logistinių grandinių ir ilgalaikės uosto autonomiškumo plėtros strategijos.

Simboliai

$[A(\phi_i)]$ ir $[A(\phi_j)]$ – yra koordinačių transformacijos matricos;

$[A_{11}]$, $[A_{12}]$, $[A_{13}]$, $[A_{31}]$, $[A_{32}]$, $[A_{33}]$ – pagalbinės matricos, skirtos transmisijos matricai sudaryti;

$[A_{tr}]$ – transmisijos matrica;

$\{B(Y, t)\}$ – netiesinis sistemos vektorius;

c_{ij} – lyno slopinimo koeficientas;

$[C_{tr}]$ – transmisijos slopinimo matrica;

C_{ei} – variklio parametrai;

C_{e3} , d_{e3} – variklio parametrai;

C_4 – konteinerio masių centras;

C_3 – konteinerio transportavimo mechanizmo masių centras;

C_1 – pirmo objekto masių centras;

$[C]$ – slopinimo matrica;

C_2 – tiriamosios sistemos masių centras;

d_{ei} – variklio parametras;

$\{e_3\}$ – vienetinis vektorius;

F_{Z_i} – spaudimo jėga tarp i-tojo rato ir bėgių;

$\{F_{tr}\}$ – apkrovos vektorius;

$\{F(q, \dot{q}, t)\}$ – netiesinis apkrovimo vektorius;

F_{S_i} – stabdymo jėga tenkanti ratų sistemai;

F_{ij} – tempimo jėga kabeliuose;

F_{T_i} – traukos jėga tenkanti ratų sistemai;

F_5 ir F_6 – jėgos veikiančios penktame ir šeštame lyne;

F_7 ir F_8 – jėgos veikiančios septintame ir aštuntame lyne;

$\phi_3, \phi_4, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4$ – trečiojo ir ketvirtojo variklio kampinė pozicija ir greitis;

ϕ_{ZC1} – nuokrypio kampas nuo pagrindinės judėjimo krypties;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{13}$ – kampai;

h_{b_i} – atstumas tarp bėgių ir krano ratų geometrinio centro ir jo posūkio kampas;
 I_{C2XX} – masių inercijos momentas apie X_{c2} ašį;
 I_3, I_4 – trečiojo ir ketvirtojo variklių su skriemuliais masių inercijos momentas;
 I_{C1XX} – masių inercijos momentas apie X_{c1} ašį;
 k_{ij} – lyno standumo koeficientas;
 $k_{31}, k_{34}, c_{31}, c_{34}$ – perdavimo diržo standumo ir slopinimo koeficientai;
 $[K_{tr}]$ – transmisijos standumo matrica;
 $[K]$ – standumo matrica;
 L_{ij} – lyno ilgis tarp taškų i ir j ;
 \dot{L}_{ij} – pirmoji L_{ij} laiko išvestinė;
 \dot{M}_{e_i} – asinchroninio variklio redukuoto momento išvestinė (dinaminis momentas);
 $[M_{c2}]$ – antrojo kūno (griebtuvo) masių matrica;
 M_{e1} – asinchroninio variklio redukuotas momentas;
 $[M_{c1}]$ – pirmojo kūno (vežimėlio) masių matrica;
 $[M_{tr}]$ – transmisijos masė matrica;
 M_{e3R} – trečiojo variklio apkrovos sukimo momentas;
 M_{e3} – trečiojo variklio sukimo momentas;
 $M_{21,R}(\dot{\phi}_{21})$ – trinties jėgos sukimo momentas;
 $M_{22,R}(\dot{\phi}_{22})$ – trinties jėgos sukimo momentas;
 $[M]$ – krano masių matrica;
 $[M_{crane}]$ – krano masių matrica;
 $[M_{v2}]$ – Antrojo variklio sukimo momentas;
 m_1 – vežimėlio masė;
 m_2 – griebtuvo masė;
 $Q_{\phi 2,j}$ – yra sukimo momentas;
 $Q_{\phi 1,j}$ – sukimo momentas;
 $\{Q_{c1j}\}$ – apkrovos vektorius;

$\{Q_{c2j}\}$ – yra apkrovos vektorius;

$\{\ddot{q}\}$ – krano apibendrintų pagreičių vektorius;

$\{q_{crane}\}$ – nuokrypio vektorius;

$\{q_{ci}(t)\}$ ir $\{q_{cj}(t)\}$ – kūnų masių centro poslinkio vektoriai;

$\{\dot{q}\}$ – krano apibendrintų greičių vektorius;

$\{q\}$ – krano apibendrintų poslinkių vektorius;

Q – tikslo funkcija;

R_{i0} – krano rato spindulys;

$\{R_{cb_i}\}$ – krano ratų geometrinis centras (cb_i) apibendrintoje koordinačių sistemoje X, Y, Z ;

R_3, R_4 – skriemulių spinduliai;

$\{r_{C_3}, r_{C_4}\}$ – vektorius tarp konteinerio transportavimo mechanizmo masių centro ir konteinerio masių centro;

$\{r_{ci,i}\}$ – vektorius tarp masių centro C_i ir kūno taško i ;

$\{r_{cj,j}\}$ – vektorius tarp masių centro C_j ir kūno taško j ;

$\{R_{C_1}\}$ – vektorius tarp nulinės koordinačių sistemos centro ir pirmojo objekto masių centro;

$\{r_{C_1}, r_{C_2}\}$ – vektorius tarp pirmojo objekto masių centro ir tiriamosios sistemos masių centro;

$\{r_{C_2}, r_{C_3}\}$ – vektorius tarp tiriamosios sistemos masių centro ir konteinerio transportavimo mechanizmo masių centro;

$\{r_{C_1, O_i}\}$ – vektorius, kuris eina nuo krantinės krano masės centro iki rato centro;

R_i ir $R_j - \dot{i}$ ir j vektoriai, bendroje koordinačių sistemoje OXYZ;

ΔR_i – rato nuokrypis, kuris atsiranda po ilgo naudojimosi laiko sudėtingomis sąlygomis;

R_i – spinduliai;

$\{R_{c0i}\}$ ir $\{R_{c0j}\}$ – kūnų masių centro pradiniai vektoriai;

t – laikas;

U_{redei} – reduktoriaus perdavimo skaičius;

V_{syt} – šoninis krano rato slydimo greitis;

V_{sxi} – išilginis krano rato slydimo greitis;

ω_{ei0} – variklio kampinis greitis;

ω_{e30} – variklio kampinis greitis;

ω_i – variklio kampinis greitis.

Santrumpos

AVS – automatinio valdymo sistema;

DB – duomenų bazė;

ES – Europos sąjunga;

IPM – impulso trukmės moduliacija (angl. *PWM – PulseWidth Modulation*)

PD – proporcingas diferencijuojantis;

PID – proporcingas, integruojantis ir diferencijuojantis reguliatorius/valdiklis;

RDA – Radijo dažnio atpažinimas (angl. *RFID – radio frequency identification*);

TEU – dvidešimties pėdų konteinerio vieneto ekvivalentas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
1. KRANTINĖS KRANŲ VALDYMO SISTEMŲ IR KROVOS TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA	9
1.1. Žaliojo transporto koridoriaus ir autonominių konteinerių terminalų kūrimo koncepcijos.....	10
1.2. Krantinės kranų krovos procesai ir jų automatizavimo problemos	11
1.3. Krovinio saugumas ir krovos proceso apribojimai.....	15
1.4. Kranų valdymo technologijų analizė.....	17
1.4.1. Judesio profiliai ir valdymo sistemos.....	17

1.4.2. Konteinerių perkrovos proceso dinamikos modeliavimo ir valdymo metodai.....	21
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	23
2. PASKIRSTYTO VALDYMO KONCEPCIJA IR KRANTINĖS KRANO DINAMINIS MODELIAVIMAS	25
2.1. Krantinės krano paskirstyto valdymo sistemos koncepcija	26
2.1.1. Sumaniojo konteinerio koncepcijos integravimas į autonominio krano valdymo sistemą	27
2.1.2. Realaus laiko duomenų apsikeitimas sistemoje	30
2.1.3. Sumaniojo konteinerio komunikavimas per radijo atpažinimo technologiją.....	32
2.2. Krano riedmenų techninių parametų įtaka krovos procesui	34
2.2.1. Matematinis krano riedmenų modeliavimas	36
2.2.2. Kompiuterinės imitacijos rezultatų aptarimas.....	42
2.3. Krano kėlimo mechanizmo matematinis modeliavimas ir pereinamųjų procesų analizė	43
2.3.1. Krano kėlimo mechanizmo matematinis modeliavimas	44
2.3.2. Modeliavimo rezultatai ir pereinamųjų procesų analizė	50
2.3.3. Modelio verifikavimas ir rezultatų eksperimentinė patikra.....	56
2.4. Antrojo skyriaus išvados	61
3. KRANTINĖS KRANO LABORATORINIO PROTOTIPO IR JO VALDYMO ALGORITMO PROJEKTAVIMAS BEI KROVOS PROCESO EFEKTYVUMO TYRIMAI	63
3.1. Krantinės krano laboratorinio prototipo sukūrimas eksperimentiniams tyrimams.....	64
3.1.1. Krantinės krano prototipo virtualus projektavimas	64
3.1.2. Krantinės krano vežimėlio su konteineriu judėjimo imitavimas	69
3.2. Krantinės krano laboratorinio prototipo valdymo sistemos kūrimas	73
3.2.1. Krantinės krano prototipo struktūra	74
3.2.2. Greičio profilio parinkimas valdiklio įėjimo formavimui – eksperimentinis tyrimas	75
3.2.3. Krano valdymo sistemos projektavimas Simulink aplinkoje taikant įėjimo profilį valdiklio parametų derinimui.....	84
3.3. Valdymo sistemos efektyvumo tyrimai krovos procese	95
3.3.1. Krantinės krano valdymo sistema su svyravimų kompensavimo grandimi.....	95
3.3.2. Valdymo algoritmo eksperimentiniai tyrimai	101
3.3.3. Konteinerių krovos proceso lauko eksperimentiniai tyrimai.....	108
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	111
BENDROSIOS IŠVADOS	113
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	115

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	125
SUMMARY IN ENGLISH.....	127
PRIEDAI ¹	143
A priedas. Pilnas krantinės krano matematinis modelis	144
B priedas. Laboratorinis krantinės krano prototipas.....	149
C priedas. Valdymo algoritmo programos pagrindinis kodas	151
D priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	162
E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	162

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	4
The tasks of the thesis	4
The research methodology	5
Scientific novelty of the thesis	5
Practical value of the research findings	6
Defended statements	6
Approval of the research findings	7
The structure of the dissertation	7
1. THE REVIEW OF THE QUAY CRANE CONTROL SYSTEMS AND CARGO TECHNOLOGIES	9
1.1. The concepts of green transport corridor and autonomous terminals	10
1.2. The Quay cranes and automatization problems	12
1.3. Cargo safety and handling restrictions	15
1.4. Analysis of quay crane control technologies	16
1.4.1. Motion profiles and control systems	17
1.4.2. Modeling of container handling dynamics and control methods	21
1.5. Conclusions of the 1 st chapter, formulation of thesis tasks	23

- 2. THE CONCEPT OF DISTRIBUTED CONTROL AND DYNAMIC MODELING OF THE QUAY CRANE 25
 - 2.1. The concept of quay crane distributed control system 26
 - 2.1.1. The integration of the smart concept into autonomous crane control system 27
 - 2.1.2. The exchange of real time data in the system 30
 - 2.1.3. Smart container communication using radio frequency identification technology..... 32
 - 2.2. The quay crane wheel system influence to handling processes..... 34
 - 2.2.1. Mathematical modeling of quay crane wheel system 36
 - 2.2.2. Results of computer simulation analysis 42
 - 2.3. Quay crane hoist modeling and transient analysis..... 43
 - 2.3.1. Mathematical modeling of quay crane hoist 44
 - 2.3.2. Results of modeling and transient analysis 50
 - 2.3.3. Experimental model verification and experimental results validation 56
 - 2.4. Conclusions of the 2nd chapter..... 61
- 3. DESIGN AND DEVELOPMENT THE INTERMODAL QUAY CRANE PROTOTYPE, CONTROL AND HANDLING EFFICIENTLY ANALYSIS 63
 - 3.1. Development of quay crane laboratory scaled prototype for experimental research 64
 - 3.1.1. Virtual modeling of quay crane laboratory scaled prototype 64
 - 3.1.2. Motion simulation of quay crane trolley with cargo 69
 - 3.2. Developing a control system for quay crane laboratory scaled prototype 73
 - 3.2.1. Structure of quay crane laboratory scaled prototype..... 74
 - 3.2.2. Motion profile for controller input shaping – for experimental research 75
 - 3.2.3. Design of Quay crane control system using Simulink for controller tuning with applied input shaper 84
 - 3.3. The efficiently of control system during cargo handling 95
 - 3.3.1. Quay crane control system with sway compensation..... 95
 - 3.3.2. Experimental research of control algorithm 101
 - 3.3.3. Field experiments of container handling..... 108
 - 3.4. Conclusions of the 3rd chapter 111
- GENERAL CONCLUSIONS 113
- REFERENCES 115
- LIST OF THE SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION 125
- SUMMARY IN ENGLISH..... 127

ANNEXES² 143

Annex A. Full mathematical model of quay crane 144

Annex B. Quay crane prototype 149

Annex C. The main source code of control algorithm 151

Annex D. Agreements of co-authors to provide published material
in the dissertation 162

Annex E. Copies of scientific publications by the author on the topic
of the dissertation 182

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Pilnai veikiantis žaliasis transporto koridorius transporto inžinerijos mokslo sampratoje kol kas yra tik Europos sąjungos „Horizont 2020“ programoje deklaruotas iššūkių kompleksas. Pagrindinė idėja yra ta, kad krovinyms turi būti saugiai ir kuo sparčiausiai pergabentas. Logistinėje grandinėje, jūriniuose intermodaliniuose krovos terminaluose, konteineryje esantis krovinyms gauna maksimalią perkrovą. Svyruojantis laivas ir vėjas išsiūbuojantis šimtą metrinių krantinės kranų trosais palaikomą konteinerių griebtuvą ir žmogiškas faktorius bei per lėta operatoriaus reakcija, sukelia konteinerio svyravimus. Tai kelia pavojų kroviniui ir operatorių skatina lėtinti krovos „krantas–laivas“ ar atvirkščiai procesą. Jau kuriami išmanieji konteineriai, kurie gebės RDA technologija krantui perduoti informaciją apie konkretaus krovinio atsparumą perkrovai. Todėl intelektualaus transporto uždavinyje yra būtina sukurti naują sumanaus krantinės kranų koncepciją, naujus matematinius jo mechanizmų valdymo algoritmus ir įdiegti į sistemą pažangius valdiklius tam, kad artėjant krantinės kranų griebtuvams prie konteinerio laive, kranų sumanioji sistema konkretų konteinerį saugiai perkrautų individualiu sparčiausiu režimu. Taip būtų realiu laiku atsižvelgta į vėjo ir laivo sukeltus svyravimus įvertinant kranų mechanizmų sisteminę specifiką. Taip pat siekiant

didinti krovos efektyvumą ir kranų autonomiškumą, yra būtinybė sukurti naujas konteinerio svyravimus slopinančias sumaniąsias valdymo sistemas.

Modernioje sparčioje technologijoje nepertraukiamas griebtuvo ir jį pozicionuojančio kranų vežimėlio judėjimas vienu metu yra viena iš pagrindinių priežasčių, sunkinančių krovos valdymo algoritmų optimizavimą. Dažnai nepakankamai įvertintas vežimėlio judėjimo greitis sukelia didesnius ir dar nepakankamai slopsinančius krovinio svyravimus. Todėl parenkant vežimėlio judėjimo greičio profilį būtina naujai atsižvelgti į tokius veiksnius, kaip teorinis ir realus krovinio judėjimo greitis, momentiniai pagreičiai, svyravimų amplitudė, stabilizavimosi laikas ir bendra transportavimo trukmė.

Taigi pagrindinė problema kurią būtina spręsti – sumanaus transporto krovos spartinimo priemonių įvairovės didinimas ir siekis sukurti tokius konteinerių krovos valdymo algoritmus bei krovos metodikas, kurie paspartintų saugią konteinerių krovą, mažinant kranų transportuojamo konteinerio svyravimus, taip didinant krovinio saugumą. Todėl žinomose kranų valdymo sistemose pabrėžiama, kad dėl dinamiškai kintančių griebtuvo ir kranų strėlės vežimėlio padėčių, kuriant naujus algoritmus, tikslinga taikyti judesio profilio tyrimo metodus. Kroviniui judant iš pradinio taško A galinį tašką B, judesio greičio profiliavimui aprašyti dažniausiai naudojami du metodai: trapecinis ir S kreivių profiliai. Trapecinis judesio valdymo profilis yra nesudėtingai realizuojamas ir šiai dienai plačiai naudojamas valdymo sistemose. S-formos profilis yra grindžiamas universalumo principu ir gali prisitaikyti prie sistemos dinamiškumo. Tačiau šie metodai nevertina grįžtamojo ryšio ir todėl jų taikymas sumanaus valdymo sistemose yra ribotas. Sistemos dinamikos charakteristikų pagerinimui būtina naudoti valdiklius, pranašesnį S kreivės greičio profilį, pagrindinius greičio grįžtamuosius ryšius bei papildomus grįžtamuosius ryšius krovinio svyravimams slopinti. Bet tam būtini tikslūs duomenys apie konteinerio griebtuvo realius svyravimus ir jų atsiradimo priežastis.

Darbo aktualumas

Į Klaipėdos uostą atplaukia 9 000 TEU ($1 \text{ TEU} = 38,5 \text{ m}^3$) talpos konteineriniai laivai. Po uosto rekonstrukcijos bus laukiami didieji jūriniai $> 20 \text{ 000 TEU}$ talpos, laivai. Todėl mokslui yra aktualu sukurti naujas technologijas, kaip sparčiausiu būdu juos perkrauti nepertraukiamame krovos operacijų cikle. Tampa ypač aktualu automatizuoti krantinės kranus, kurie net deklaruojamuose autonominiuose uostuose kol kas išlieka valdomi operatoriaus. Netolimoje ateityje, žaliuose – autonominiuose jūriniuose terminaluose visuotinai bus įdiegta sumanaus konteinerio koncepcija, nešanti informaciją ne tik apie krovinio logistiką, bet ir sparčiai krovai žinotinas jo technines charakteristikas. Todėl tampa aktualu kurti uostams

naujas intelektinės krovos ciklo „laivas–krantas–laivas“, operacijų valdymo technologijas, paremtas naujais matematiniais modeliais ir sumaniais automatinio valdymo algoritmais, derinančiais krovos spartą su krovinio saugumu, gebančiais išvengti konteinerio įsisvyravimo.

Žinomi krantinės krano automatizavimo metodai nėra universalūs, jų taikymas keblus, loginiais operatoriais ar algoritmais aprašyti modelį neįmanoma, nesukūrus analizuojamos sistemos naujo matematinio modelio programavimo uždavinių forma. Todėl tokio tipo inžinerinių uždavinių sprendimui, kai konteineriniai laivai atveža dešimtis tūkstančių konteinerių į uostą, tampa aktualu išnaudoti ypatingą kompiuterių našumo padidėjimą ir efektą išgauti naujais, optimizavimo metodais, kurie leidžia efektyviau spręsti sudėtingus valdymo sistemų optimizavimo uždavinius pilnai autonominiame terminale. Vieni iš pagrindinių sistemų sintezės algoritmų yra optimizavimo algoritmai, nuo jų efektyvumo priklauso ne tik sistemos sintezės kokybė, bet ir pati sintezės galimybė. Tokius uždavinius, naudojant populiarius klasikinius metodus, galima spręsti, kai valdymo objektai yra paprasti ir turi matematinį modelį. Nurodyti metodai nėra universalūs, jų taikymas keblus kai objektas turi loginiais operatoriais ar algoritmais aprašytą modelį, ir neįmanomas, kai matematinio modelio išvis nėra. Todėl dabartiniu metu vis dažniau taikomi ir nuolat tobulinami modernūs valdymo metodai. Jų pagrindą sudaro optimizavimo algoritmai, kuriais apytikriai sprendžiami optimalaus valdymo, kintamos struktūros ir kiti AVS sintezės uždaviniai, suformuluoti matematinio programavimo uždavinių forma. Šių metodų taikymo efektyvumą nulėmė ypatingas kompiuterių našumo padidėjimas ir optimizavimo metodų, kurie leidžia efektyviai spręsti sudėtingus valdymo sistemų optimizavimo uždavinius, raida.

Tyrimų objektas

Disertacinių tyrimų objektas yra sparčioji ir kartu saugi konteinerių perkrova iš didžiųjų konteinerinių laivų (>9 000 TEU) į konteinerių vežėjus krante, kuriant ir diegiant „žaliajame“ uoste autonominio krantinės krano ir išmaniųjų jūrinių konteinerių koncepcijas.

Darbo tikslas

Išmaniųjų jūrinių konteinerių perkrovai „žaliojo koridoriaus“ mazge „laivas–krantas–laivas“ sukurti krantinės krano valdymo sistemos prototipą su algoritmu, generuojančiu specifinės krovos greičio kitimo projekcijas, realizuojamas PID valdikliu su integruota svyravimų slopinimo funkcija, siekiant paspartinti krovos procesą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę, siejamą su „žaliojo uosto“, „autonominio krantinės kranų“ ir „išmanaus konteinerio“ koncepcijos diegimu autonominiame uoste. Palyginti žinomų krantinės kranų valdymo algoritmų pranašumą ir jų efektyvumą krovos cikle. Išanalizuoti krovos algoritmuose taikomas valdymo technologijas bei jų panaudojimo galimybes realizuojant krovos technologinius režimus.
2. Konteinerių krovose atsirandančių dinaminių apkrovų imitacijai sukurti krantinės kranų mechaninius procesus aprašantį diferencialinių lygčių modelį, kuris būtinas programuojant kranų vežimėlio judėjimo greičio profilius, nustatant krovinio svyravimų amplitudę, griebtuvo stabilizavimosi trukmę ir bendrą transportavimo ciklo trukmę.
3. Sukurti autonominio krantinės kranų, skirto konteinerių krovai, laboratorinį prototipą su sistema valdančiu išmaniuoju algoritmu, leidžiančiu eksperimentiškai patvirtinti teorines prielaidas.
4. Atlikti tyrimus bei skaičiavimus palyginant sukurtą sumanų valdymo algoritmo ir pasiūlytos konteinerių svyravimą slopinančios sistemos našumą ir spartą su žinomomis. Eksperimentu įvertinti sukurtos sumanios valdymo sistemos efektyvumą, individualiam konteineriui pritaikant skirtingus greičio kitimo profilinius ir PID valdiklio parametrus.

Tyrimų metodika

Darbe nagrinėjant tyrimų objektą taikyti šie metodai:

- klasifikacijos, leidžiantys apibrėžti bei suprasti tyrimų objektą, apibendrinant išanalizuotus literatūroje pateiktų duomenų ypatumus, privalumus bei trūkumus;
- teoriniai (analizės bei sintezės), leidžiantys pasirinkti iškeltų uždavinių sprendimo paieškos strategiją;
- žvalgomasis tyrimas, leidžiantis surasti iškeltos problemos sprendimą;
- eksperimentiniai, leidžiantys patikrinti iškeltas hipotezes;
- statistikos, leidžiantys įvertinti išvadų statistinį reikšmingumą.

Darbo mokslinis naujumas

Vienas iš pagrindinių kuriamų žaliųjų koridorių sąrangos mazgų yra konteinerių krova iš laivo į krantinę, kurių naujai atskleista reikšminga prasmė generuoja trijų koncepcijų (autonominio terminalo, autonominio krantinės kranų ir išmanaus konteinerio) suglaudinimo poreikį viename uždavinyje.

1. Sukurtas jūriniame intermodaliniame terminale dirbančio krantinės kranų, kaip netiesinės dinaminės sistemos, matematinis modelis, kuriuo nustatomos dinaminės charakteristikos, o tai yra svarbu didinant transportavimo saugumą bei mažinant griebtuvo svyravimų stabilizavimosi ir bendrą konteinerio perkrovos ciklo trukmę.
2. Plėtojant išmaniųjų jūrinių konteinerių koncepciją, teikiančią papildomą informaciją apie konteinerį ir jame esantį krovinį, pritaikytą prie paslaugų teikėjo poreikių, sukurtas naujas integruotas autonominio krantinės kranų valdymo algoritmas su pasiūlyta įterptine, konteinerio svyravimus slopinančia paprograme, leidžiančia valdymo sistemoje panaudoti greičio kitimo profilius ir PID valdiklius.
3. Sukurtas laboratorinis krantinės kranų valdymo sistemos išmanusis prototipas leidžiantis eksperimentu patikrinti teorines išvadas bei dinamiiniame kranų ir aplinkos režime rasti optimalų valdymo sprendimą, būtent kokiais perkrovos režimais transportuoti konkretų konteinerį sutrumpinant perkrovos ciklą.
4. Parodyta, kad tokia eksperimentiškai tikrinama autonominė krantinės kranų valdymo technologija tampa sumaniųjų valdymo algoritmų kūrimo pagrindu, kurioje įvertinama konkretaus konteinerio krovos, planavimo ir sprendimų priėmimo specifika, siekiant pagreitinti autonominės krovos procesą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Svariausią disertacijoje atliktų tyrimų praktinę reikšmę parodo tai, kad nacionaliniame uoste įdiegus tris suglaudintas koncepcijas (autonominių terminalo ir krantinės kranų bei išmanaus konteinerio), galima sukurti nepertraukiamą konteinerių perkrovą, kartu tausojant žmogiškuosius resursus. Dėl to iškraunant $\geq 10\,000$ TEU talpinantį laivą, kiekvienam konteineriui perkrauti sutaupomos kelios sekundės, todėl kartu mažinamos ir laivo prastovos uosto teritorijoje.

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami įvairaus tipo kranų valdymo sistemų projektavimui ar modernizavimui. Kuriant naujus valdymo algoritmus, siekiama

didinti krovinio svyravimų kompensavimo grandies efektyvumą bendroje kranų valdymo sistemoje – atsižvelgiant į slopinimo koeficientą ir įvertinus kiekvieną individualų konteinerį, galima pasiekti panašų slopinimo koeficientą visais transportavimo atvejais. Tyrimo metu gauti individualizuoto krovinio transportavimo charakteristikų rezultatai naudingi kuriant adaptyvius valdymo algoritmus, kurie ypač aktualūs, kai yra nežinomi krovinio parametrai ir jo charakteristikos.

Ginamieji teiginiai

1. Saugiai ir sparčiai individualaus konteinerio krovai cikle „laivas–krantas–laivas“ būtina nagrinėti skirtingo tipo krovinų krovos režimus, sukuriant išmaniąją autonominio krantinės kranų sistemą valdantį algoritmą ir laboratorinį krantinės kranų prototipą, leidžiantį eksperimentu nustatyti ir patikrinti optimalų valdymo sprendimą leidžiantį ~8 % paspartinti krovos ciklą.
2. Mažinant individualaus konteinerio krovos procedūrų trukmę ir didinant krovos saugą, reikia sukurti metodiką leidžiančią išmaniųjų jūrinių konteinerių teikiamą informaciją pritaikyti krovos cikle panaudojant S-formos greičio kitimo profilį.
3. Spartinant krovos procesą autonominiame konteinerių terminale veiksminga naudoti moderniomis valdymo technologijomis paremtą valdymo algoritmą, gebantį generuoti specifinius krovos režimus bei slopinti individualaus konteinerio svyravimus krovos cikle panaudojant papildomą valdymo kontūrą, leidžiantį didinti krovos našumą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbta 11 moksliniai straipsnių: vienas – mokslo žurnale, įtraukta į Thomson ISI sąrašą (2016 metais); du – recenzuojamuose periodiniuose mokslo žurnaluose (2012–2016 metais), keturi – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (2012–2013 metais), keturi – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose (2012–2015 metais).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje*“ 2012–2014 m. Klaipėdoje;
- Nacionalinėje jūros mokslų ir technologijų konferencijoje „*Jūros ir krantų tyrimai – 2013*“ Klaipėdoje;

- Tarptautinėje konferencijoje „*TRANSBALTICA 2013*“ Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Transport Means – 2012*“ Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*The 10th Jubilee International Conference on Marine navigation and Safety of Sea transportation*“ 2013 m., Gdynėje, Lenkija.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas ir yra penki priedai.

Darbo apimtis yra 142 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 51 numeruota formulė, 77 paveikslai ir 9 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudotas 101 literatūros šaltinis.

Krantinės kranų valdymo sistemų ir krovos technologijų apžvalga

Apžvelgiamos žaliojo uosto kūrimo koncepcijos, apribojimai ir jų įtaka krovos procesui. Aptarti žinomi konteinerio krovos proceso „laivas–krantinė“ matematiniai modeliai ir jais grindžiami sistemos valdymo algoritmai. Išanalizuotos pagrindinės mokslinių darbų kryptys ir tendencijos, kuriose siekiama sukurti sparčius ir saugius krantinės kranus autonominiam konteinerių intermodalinės krovos jūriniam terminalui. Atlikta mokslinės literatūros apžvalga siejasi su disertacijos tikslu sukurti individualizuotą krovos technologiją, skirtą krantinės kranų valdymui pritaikant sumaniuosius algoritmus kombinuojant krovos greičio projekcijas pagal gaunamą informaciją iš išmaniųjų jūrinių konteinerių.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Eglynas *et al.* (2013), Lenkauskas *et al.* (2013), Eglynas *et al.* (2014), Andziulis *et al.* (2015).

1.1. Žaliojo transporto koridoriaus ir autonominių konteinerių terminalų kūrimo koncepcijos

Klaipėdos uostas yra tik vienas iš kuriamo transporto koridoriaus „Rytai–Vakarai“ nacionalinės vizijos fragmentų, suponuojančių siekį sukurti draugišką aplinkai ir kartu tarptautiniu mastu ypač konkurencingą žaliojo transporto koridorių, kertantį Lietuvą. Todėl viena iš prioritetinių kryptių yra plėtoti uostamiesčio jūrų verslą ir mokslą bei paversti Klaipėdos uostą „pavyzdiniu žaliuoju uostu“. Galimi du problemos sprendimai: statyti giliavandenį uostą (V. Paulauskas, D. Paulauskas, & B. Plačienė, 2002; V. Paulauskas & D. Paulauskas, 2013; V. Paulauskas, D. Paulauskas, B. Plačienė, & V. Lukauskas, 2016) arba įdiegti krovos darbuose ypač efektyvias žaliąsias išmaniąsias technologijas. Abiem atvejais atsilaisvintų krantinės žaliajam miestui.

Transporto inžinerijos požiūriu žaliojo transporto koridoriaus kūrimas supuoja naujų idėjų Klaipėdos miesto mokslui ir praktikai. Šiuo metu yra dar nedaug atvejų, kai uostus sujungia žaliosios laivybos linijos. Ateities žaliosios laivybos linijos dirbs pagal palydovinės navigacijos trajektorijas, užpildytas autonominiiais laivais. Laivas tampa jutikliniu tinklu su superkompiuteriu, valdančiu aibę milžiniško laivo įrenginių (K. J. Lee, Shin, Lee, Kim, & Kim, 2013). Klaipėdos universiteto mokslininkai yra sukūrę originalias laivo variklių ir kitų įrenginių prevencinės diagnostikos sistemas. Šiuo laivybos vystymosi laikotarpiu krantą realiu laiku pasiekia informacija apie galimus gedimus, todėl gedimų suvaldymui yra sistemingai pasiruošiama. Toks išmanusis laivas geba sukurti mobilų, pvz., Ad-Hoc tinklą su artimai aplink save esančiais laivais ir reaguoja į bet kurio arti esančio laivo navigacinio judėjimo dinaminis ypatumus. Intensyvėjant eismui prie uosto įplaukos ir uoste, yra siūlomos naujos išmaniosios navigacinės, tarpusavyje ir su krantu komunikuojančios, sistemos, kurios pradžioje suteikia laivavedžiui geresnę orientaciją intensyvėjančioje uosto laivyboje.

Atplaukus laivui į uostą, konteinerių, birių ir skystų krovinių krovos proceso metu vyksta laivų išmetamųjų dūmų intensyvus išmetimas, bunkerinių vandenų užteršimas invaziniais gyviais ir kiti žalingi procesai. Todėl šių procesų ir jų poveikio mažinimas yra prioritetinė mokslinių darbų kryptis. Dėl minėtų priežasčių uosto veikloje turi būti intensyviau išnaudojami draugiški aplinkai uosto vilkikai, o krantinėse turi būti siekiama eliminuoti galingus dyzelinius vežėjus. Ateityje juos pilnai pakeis autonominiai elektrovežiai (Cai, Huang, Liu, & Dissanayake, 2014; Maigret, 2014), pvz., kaip Vokietijos Altenwerderio konteinerių terminale (1.1 paveikslas).



1.1 pav. Altenwerderio konteinerių terminalas (Vokietija)
Fig. 1.1. Altenwerden container terminal (Germany)

Šiuo metu į Klaipėdą atplaukia iki 9 000 TEU (1 TEU = 38,5 m³) talpos konteineriniai laivai, o ateityje numatoma, kad atplauks didieji jūriniai laivai – 20 000 TEU talpos. Todėl vienas iš būdų pasiekti „žaliojo uosto ir krovos“ koncepciją – visuotinai krovos ir transporto grandinėse įdiegti išmaniuosius konteinerius ir juose vežti krovinius. Išmaniojo konteinerio koncepcija, kartu su kol kas dar įgyvendinamomis autonominio laivo ir intermodalinio terminalo koncepcijomis bei atsiradus didiesiems (transatlantiniams ar tolimesnių maršrutų) konteineriniams laivams, atveria transporto ir IT mokslui naujas vystymo ir tyrimų, jungiančių laivą, krantinę ir tolimesnį vežėją, galimybes, į kurias būtų įtraukiamos uosto tarnybos ir logistinės kompanijos. Ateities išmani navigacija sugebės operatyviai, efektyviai ir saugiai prišvartuoti naują žaliąją technologiją aprūpintą laivą prie krantinės, kurioje jį aptarnaus IT valdomi įrenginiai. (Monios & Bergqvist, 2015; Parola & Sciomachen, 2005).

Moksliniai tyrimai parodė, kad įdiegti tik išmaniuosius konteinerius nepakanka – turi būti sukurtas vienas kitą sekančių, saugančių bei tarpusavyje bendraujančių išmaniųjų konteinerių mobilus tinklas. Taip yra todėl, kad išorinių ryšių prieiga prie konkretaus konteinerio tūkstantinių metalinių konteinerių piramidėje laive ar krante yra komplikauta (Kim & Lee, 2015). Atplaukus laivui prie krantinės, virtualia erdve aprėpta logistinė grandinė informuoja autonominio terminalo įrenginius, kaip reikia elgtis krovoje su kiekvienu konteineriu individualiai, kad krovinsys kuo sparčiausiai paliktų žaliąjį miestą. Klaipėdos universiteto mokslininkai yra sukūrę išmaniojo konteinerių krantinės krano maketą, kuris RDA technologija nuskaitęs informaciją apie krovinį konteineryje (dužus ar ne ir t. t.), sukuria individualius, kiekvienam konteineriui skirtus, krovos režimus priklausomai išorinio poveikio (vėjo) stiprio. Šių dienų mokslo aktualija – rasti būdus, kaip trumpinti krovos laiką ir mažinti elektrovežio akumuliatoriaus iškrova, konteinerį perkraunant vežėjui, jam judant. Idealiai sinchronizuota ir individualizuota krovos technologija vienam konteineriui gali sutaupyti daugiau kaip keletą sekundžių, o

10 000 konteinerių talpinančiam laivui gali sutaupyti parą brangios prastovos uoste (Meyer-Larsen, Lyridis, Müller, & Zacharioudakis, 2012; Ting, Wang, & Ip, 2012; X., 2013). Idealiu atveju konteinerio krovos metu, atlikus jo 3D skenavimą, galima aptikti transportavimo metu apgadintus konteinerius ar jo dalis ir tinkamoje vietoje jas pakeisti.

Žalias uostas taip pat yra numatomas kaip saugus uostas miestui. Transporto koridoriai prasideda kituose ES ir, kartais ne visai patikimuose, uostuose (Monios & Wilmsmeier, 2013; Tsamboulas, Vrenken, & Lekka, 2007; Wilmsmeier, Monios, & Lambert, 2011). Klaipėdos, kaip ir kituose pasaulio uostuose, augant konteinerių srautams terminaluose, auga ir rizikos, susijusios su pavojingų medžiagų nelegaliu pervežimu, kažkuriame ilgos transportavimo grandinės etape. Dėl nelegalių krovinių pervežimų ir terorizmo grėsmės pasaulis atsakė naujais tarptautiniais reglamentais, saugumo iniciatyvomis ir nustatė pasaulio jūriniams konteinerių terminalams pasiruošti 100 % konteinerių patikrai uostuose. Šiuo metu reikalaujama patikrinti tik iki 5 % konteinerių, kurių patikra atliekama pušiau rankiniu būdu. Išmanusis kranas, naudodamas superkompiuterio resursus ir debesų kompiuteriją, geba šią funkciją atlikti, surinkdamas duomenų informacinį srautą iš gretutinių konteinerių, informuojančių apie galimas pastebėtas pavojingas medžiagas ar veiksmus.

Jūriniame terminale sėkmingai iškrautas kroviny, dar tik kuriama žaliaisiais kelių ir geležinkelių transeuropiniais koridoriais, transportuojamas iki logistikos terminalų, kirsdamas kelių valstybių sienas. Šis kroviny taip pat turėtų būti išskirstomas vartotojams pasinaudojant žaliosiomis technologijomis.

1.2. Krantinės kranų krovos procesai ir jų automatizavimo problemos

Pasauliui orientuojantis į „žaliojo“ koridoriaus koncepciją uoste, didėsiantiems transporto srautams aptarnauti sparčiai augs konkurencingų krovos technologinių procesų valdymo tikslumo ir saugumo užtikrinimo poreikiai. Naujausios uosto infrastruktūros technologijos ir priemonės, tokios kaip sumanieji konteineriai, autonominiai uosto krautuvai ar autonominiai ožiniai kranai, sparčiai atsiranda modernių terminalų infrastruktūroje (Kim & Lee, 2015; Parola & Sciomachen, 2005). Taip pat keisis ir konteinerinių krovinių srautai, kurių aptarnavimui ir saugumo užtikrinimui skiriamas didelis dėmesys. Intermodalinio transportavimo metu konteineris yra veikiamas išorinių jėgų ir oro sąlygų, kurios gali deformuoti konteinerį ir (arba) jame esančius krovinius, pažeisti krovimo technologijas ar sugadinti įrangą. Tam, kad būtų užtikrintas krovinio bei uosto įrenginių saugumas, būtina esamas sistemas papildyti intelektinėmis transporto technologijomis, kurios leistų dalinai kontroliuoti riziką ir jos faktorius.

Didėjant krovinių srautams, intermodaliniams terminalams teks vis didesnis veiklos krūvis (Vasiliauskas & Barysiene, 2008), todėl krantinės kranų valdymo įranga yra paruošiama sparčiai krovai. Tokiu būdu užtikrinamas transportavimo proceso našumas, tačiau daugeliu atvejų nuošalyje paliekamas transportuojamo krovinio saugumas. Šiame darbe pateikta dinaminio valdymo koncepcija, kuri sumažintų riziką pažeisti krovinį. Matematiniai modeliai, specifiniai valdymo algoritmai, kranų bei konteinerio jutiklinis tinklas suteikia galimybę operatoriams įvertinti transportuojamo konteinerio rizikos lygį. O dinaminis valdymas ir situacijų imitacijos padės įvertinti intermodalinio transportavimo proceso nuokrypius nuo apribojimų ar optimalaus kelio. Papildomų intelektinės transporto sistemos modulių integracija į krantinės kranų valdymo sistemą užtikrins, kad visi procesai būtų atliekami remiantis optimalaus valdymo principais. Integruota dinaminio valdymo sistema suteikia galimybę vartotojams stebėti transportavimo proceso parametrus realiaje laike. Pagalbinės kranų sistemos suteikia galimybę operatoriams priimti sprendimus, turinčius įtakos transportuojamo krovinio saugumui.

Šiame darbe apžvelgtos problemos, darančios įtaką krovinio saugumui, taip pat nagrinėjami krantinės kranų apribojimai bei galimos pasekmės jų nesilaikant, apžvelgiamos RDA technologijos pritaikymo galimybės intermodalinio transportavimo procese. Disertacijoje pateikta sukurta paskirstyto sistemos valdymo modelio koncepcija. Ši koncepcija paremta jutiklinio tinklo duomenų panaudojimu krovinio stabilizavimui ir dinaminiam valdymui. Realizuojant paskirstytos valdymo sistemos principais, galima realizuoti sumaniųjų konteinerių koncepciją, krantinės kranuose įdiegiant autonominę krovą užtikrinančias valdymo technologijas.

Dauguma šiuolaikinių krantinės kranų veikia valdomi operatoriaus. Konteinerio pakėlimas, nuleidimas, transportavimas nuo vienos platformos ant kitos – tai tik keletas veiksnių, už kuriuos atsakingas žmogus, tačiau neigiamas krovos pasekmės gali sukelti ne vien tik jo veiksmai. Klaida ar neįvertintas aplinkos veiksnys valdymo algoritme gali sukelti pavojų konteineriui ir krovinio saugumui. Norint kontroliuoti krovos riziką, būtina tobulinti valdymo sistemas ne tik keičiant jų programinę įrangą, bet ir kuriant papildomus modulius, kurie, integruoti į egzistuojančias sistemas, padėtų kontroliuoti krovinio saugumą.

Šių dienų terminaluose intermodalinė krova vyksta konvejerio principu, todėl dažnai iki krovinio pažeidimo būna tik vienas žingsnis. Norint pasiekti geriausių krovos rezultatus, neužtenka vien tik žinoti krovinio saugumo lygį, bet būtina į valdymo algoritmus įtraukti aplinkos veiksnius ir teorinį konteinerio transportavimo kelią. Naudojant dinaminis modelius, galima atlikti įvairių situacijų imitacijas. Integravus imitacijų rezultatus į krovos procesą, atsiranda galimybė stebėti realių rezultatų pokyčius. Šių pokyčių stebėjimas ir vertinimas realiu laiku taip

pat prisidėtų prie rizikos valdymo. Integravus jutiklinį bloką su valdymo ir duomenų perdavimo moduliu į Intermodalinio krantinės kranų kėlimo mechanizmo sistemą, atsiranda galimybė realiu laiku lyginti turimus duomenis su teoriniais duomenimis ir, esant didesniems nuokrypiams, koreguoti transportavimo proceso režimus.

Pastaraisiais metais mokslininkai vis dažniau nagrinėja krantinės kranus. Viena iš sprendžiamų problemų, su kuria susiduriama dažniausiai – tai konteinerių kėlimo kranų ir jo valdymo algoritmų optimizavimas (C. Chang, Chiang, & Description, 2008; Chao & Lin, 2011; Schaub, 2008; Tanaka, Konishi, Araki, Sato, & Ishigaki, 2009; Zhi-jun *et al.*, 2012). Šiai dienai yra sukurta daug įvairiausių valdymo algoritmų, kurie laboratorinėmis sąlygomis sprendžia atskiras krantinės kranų valdymo problemas. Tačiau vis dar išlieka kompleksinių algoritmų poreikis, orientuotų ne tik į atskiras krovos procedūras, bet ir į visą „laivas–kranas–laivas“ krovos procesą.

Dažniausiai naujų krantinės kranų valdymo algoritmų kūrimas (D. Chang, Jiang, Yan, & He, 2010) yra siejamas su uždaviniu, kuriame yra bandoma išspręsti konteinerio svyravimų problemą. Šių svyravimų atsiradimo priežastys kiekvienu atveju gali būti skirtingos (Cao & Liu, 2011; Fang, Wang, & Zhang, 2012; Yoshihara, Fujioka, & Kasahara, 2003; Sano, Ohishi, Kaneko, & Mine, 2010; Tanaka, Konishi, Araki, & Ishigaki, 2008). Kartais svyravimai yra sukelti paties kranų mechanizmų (variklio darbo ar nelygaus bėgių paviršiaus, kuriais juda įrenginiai), tačiau pasitaiko atvejų, kai svyravimų priežastys nežinomos. Jas gali sukelti kompleksinis jėgų rinkinys, veikiantis konteinerį ir net konteinerio viduje.

Kranų krovinių svyravimų problemas bando išspręsti ir kiti mokslininkai (Cao & Liu, 2011; Yoshihara *et al.*, 2003; Nundrakwang *et al.*, 2008). Minėti mokslininkai savo tyrimuose konteinerio nagrinėję kranų kėlimo mechanizmą, kuriame konteineris su kranu sujungtas metaliniais lynais. Dėl skirtingų konteinerių svorių, vėjo gūsių ir valdymo algoritmų konteineris dažnai pradeda svyruoti. Dėl to prireikia daugiau laiko, kad konteineris būtų transportuotas iš taško A į tašką B. Nėgana to, dėl kintančių pagreičių atsiranda tikimybė, kad konteineris gali būti pažeistas, atsitrenkus į krantinės kranų konstrukcijas. Kaip žinoma, esant stipriam vėjui, krantinės kranai dažniausiai nevykdo krovos darbų, o tai padidina krovos kaštus. Taigi viso šito stengiamasi išvengti, kuriant tiek techninius, tiek programinius sprendimus.

Didėjant laivų talpai ir intensyvėjant intermodalinių konteinerinių pervežimams, atsiranda poreikis kurti ir tobulinti intermodalinių transportavimų priemonės uoste. Krantinės kranai – ne išimtis. Jų poreikis yra stipriai išaugęs nuo tada, kai pirmasis krantinės kranas buvo sukurtas (Crainic & Kim, 2007; Georgijević, 2010; Nenad, Oguamanam, & Bošnjak, 2006). Šiems pokyčiams įtakos turėjo ne tik ekonominiai veiksniai ir besikeičiantys laivų dydžiai. Tobulėjant technologijoms bei vartotojų poreikiams, tuo pačiu didėjo ir laivai, o su jais

ir krantinės kranai, kurie tampa didesni, masyvesni ir pajėgesni savo galimybėmis. Tobulėja ne tik jų galimybės bei techninės charakteristikos, kurios buvo papildytos sudėtingais krovos procesą reguliuojančiais algoritmais.

Konteineris yra pagrindinė priemonė, naudojama intermodaliniame transportavime (Nundrakwang, Benjanarasuth, Ngamwiwit, & Komine, 2008; Roso, Woxenius, & Lumsden, 2009), o vienas populiariausių jo transportavimo būdų – laivai. Kasmet intermodaliniuose terminaluose yra perkraunama milijonai įvairaus tipo konteinerių, o vienas iš pagrindinių transporto objektų, naudojamų intermodalinio transportavimo metu, kai vykdoma krova iš laivo į sunkvežimius ir atgal, yra didieji krantinės kranai. Taigi, galima teigti, kad krovos procesas yra vienas iš svarbiausių intermodalinių transportavimo etapų, kuriame būtina užtikrinti aukštą saugumo lygį, tiek fiziškai, tiek ir technologiškai. Klaidingi operatoriaus veiksmai ar netinkamas algoritmas gali ne tik pažeisti konteinerius ar jame esančius krovinius, bet ir sužaloti terminalo darbuotojus ar sugadinti kitus netoli krantinės kranų esančius transporto objektus (konteinerių keltuvus, sunkvežimius, infrastruktūrą). Dėl saugumo reikalavimų pažeidimų gali įvykti avarijos ar techninė katastrofa – krantinės kranų nuvirtimas ar strėlės nulūžimas.

Taigi blogai sukurtas kėlimo mechanizmo valdymo algoritmas ir visi konteinerių veikiantys išoriniai faktoriai gali sukelti nepageidaujamus veiksmus, kurie daro įtaką konteinerio ir krovinio saugumui. Todėl svarbu įvertinti parametrus, kuriuos atitinkamai valdant bei parenkant optimalias jų vertes, būtų galima iš dalies kompensuoti atsirandančias rizikas. Net ir vieno parametro tinkamas reguliavimas, turi didelę įtaką visos sistemos veikimui.

1.3. Krovinio saugumas ir krovos proceso apribojimai

Kiekvienas konteinerio savininkas nori, kad jo konteineris būtų transportuojamas saugiai. Tačiau saugumas atsispindi daugelyje aspektų. Siekiant užtikrinti konteinerio saugumą intermodalinio transportavimo metu, visų pirma reikia užtikrinti krantinės kranų valdymo sistemų optimalų veikimą. Tai padaryti padeda išmanios valdymo sistemos, kurių integravimas į bendrą kranų valdymo sistemą padidina saugumo lygį. Tam, kad krovinyje būtų saugiai transportuojamas reikia teisingai įvertinti intermodalinio krantinės kranų apribojimus. Dėl šių apribojimų, dinaminis valdymas leidžia teisingai įvertinti kranų vykdomo įrenginių būsenas bei nustatyti nuokrypius nuo optimalaus ir saugaus transportavimo kelio.

Kiekvienas krantinės kranas yra unikalus savo galimybėmis, todėl taikyti bendrus apribojimus visiems kranams nėra tikslinga. Kiekvienas konteinerių terminalas pagal poreikius ir galimybes statosi krantinės kranus, kurių specifikacijos

tenkintų krovos poreikius. Pagrindiniai krano apribojimai daugeliu atveju atspindi jų techninėse charakteristikose, tokiose kaip griebtuvo kėlimo galia, vežimėlio greitis, vežimėlio greitis transportuojant krano strėlę, krano judėjimo greitis, vežimėlio judėjimo atstumas, strėlės pasikėlimo trukmė ir kiti. Norint užtikrinti krovinio saugumą, reikia stebėti ir vertinti visus krano veikimą ribojančius parametrus. Taigi, galima sakyti, kad saugumas pasiekiamas per apribojimus (Barysienė, 2012). Taip pat reikia įvertinti ir kritines situacijas. Pavyzdžiui, kas nutiks, jeigu: nutrūks vienas iš laikančiųjų lynų; tinkle atsiras įtampos svyravimai; priešpriešinio vėjo gūsiams paveiks maksimalaus leistino svorio kėlimo procesą. Tai tik maža dalis situacijų, kurias reikėtų įvertinti, siekiant užtikrinti tiek krovinio saugumą, tiek sklandų krantinės krano darbą.

Vienas iš pagrindinių aspektų konteinerių transportavimo procese yra konteinerio ir jame esančio krovinio saugumas. Tačiau bendrame konteinerio transportavimo procese jį užtikrinti reikia įvairialypių priemonių ir technologijų. Pagrindinė intermodalinio transportavimo priemonė yra konteineris, kuris gabenamas jūriniais konteineriniais laivais, sunkvežimiais, kranais bei kitomis įvairiarūšėmis transporto priemonėmis (Kawai, Choi, Kim, & Kubota, 2008; Nundrakwang *et al.*, 2008; Roso *et al.*, 2009). Taigi milijonai skirtingų konteinerių su skirtingais krovniais yra atgabenami į intermodalinius terminalus, kuriuose daugeliu atveju jie pakraunami ar iškraunami iš laivų, naudojant konteinerinius krantinės kranus. Krano operatorius, dirbdamas krano viršuje, kranu iškrauna tūkstančius konteinerių. Tokios krovos metu dėl žmogiškojo faktoriaus gali sumažėti transportavimo saugumas. Operatoriaus klaida ar neefektyvus krano valdymo algoritmas gali daryti įtaką konteinerio pažeidimams. Šie, savo ruožtu, gali sukelti krovinio, krano ar kitų uosto objektų pažeidimus (dėl neteisingai parinkto proceso ar atliekamo operatoriaus veiksmo transportavimo metu svyruojantis konteineris gali pažeisti krano kėlimo mechanizmą, transporterius ar kitus terminalo infrastruktūros elementus) ar net sužaloti terminale dirbančius žmones. Jei specifiniai saugos reikalavimai pažeidžiami, gali įvykti nelaimingi atsitikimai ar skaudžios avarijos, tokios kaip krantinės krano strėlės nulūžimas ar net katastrofos. Viena iš pagrindinių įvykusių nelaimių priežasčių konteinerių terminaluose pastaraisiais metais dažniausiai buvo konteinerio svyravimai. Minėtų svyravimų priežastys skirtingos: stiprus vėjo gūsis, operatoriaus klaida, nesugebėjimas stabilizuoti įsisvyravusio krovinio (Cao & Liu, 2011; Yoshihara *et al.*, 2003; Kawai *et al.*, 2008; Sano *et al.*, 2010). Tokio pobūdžio svyravimams įvykti lengva, kadangi krovinyje yra pakabinamas, panaudojant plieninius lynus, kurie jungia griebtuvą su vežimėliu. Tokių svyravimų rezultatas – ilgesnis transportavimo laikas iš taško „A“ į tašką „B“, bei krovinio saugumo užtikrinimo faktoriaus sumažėjimas.

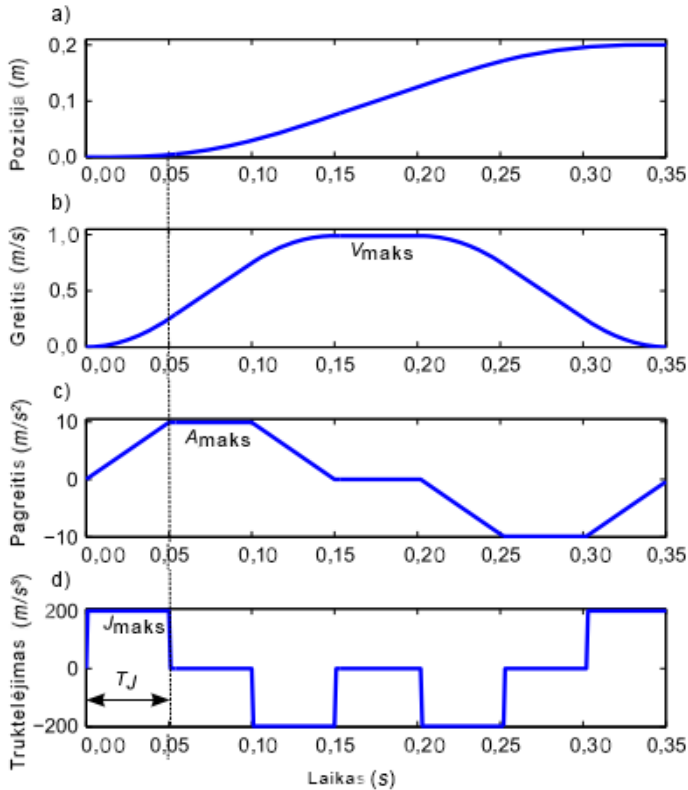
1.4. Kranų valdymo technologijų analizė

Jūriniame intermodaliniame terminale konteinerių krovos procese krantinės kranų pagrindinis valdymo objektas yra vežimėlis, varomas elektros variklių juda iki numatytos pozicijos taip greitai, kaip įmanoma, išlaikant minimalius krovinio svyravimus. (Elbadawy & Shehata, 2015; Majid, Ibrahim, Mohamad, & Bakar, 2013). Nekontroliuojami svyravimai sukelia krovinio stabilumo ir saugumo problemas, ypač konteinerio paėmimo ir nuleidimo procedūrose. Dažniausiai didelę patirtį turintys kranų operatoriai yra atsakingi už konteinerių krovos operacijas. Pastarieji, tiksliai atlikdami konteinerio pozicionavimo veiksmus krantinės kranu, pasikliauna savo vizualiniu grįžtamuoju ryšiu (atlieka valdymo operacijas, nulemiamas vizualinio matymo lauko ribose). Tokios krovos procedūros gali pasirodyti labai sudėtingos ir užimti daug laiko, ypač ekstremaliose situacijose, kai tikslus pozicionavimas visiškai priklauso nuo operatoriaus patirties (Wong, Tang, & Mailah, 2012b). Atliekant bet kokias krovos proceso procedūras, krovinyms gali lengvai pradėti svyruoti. Jei tokie svyravimai peržengia saugias ribas, jie privalo būti slopinami arba operatorius privalo pristabdyti krovos darbus iki tol, kol svyravimai sumažės iki saugios ribos. Tokių atsirandančių svyravimų visiškas pašalinimas yra praktiškai neįmanomas net ir naudojant moderniąsias valdymo technologijas, tačiau specifinėse situacijose tokie svyravimai gali būti nesudėtingai slopinami. Šiuos svyravimus gali nulemti įvairūs išoriniai veiksniai tokie kaip vėjas, orų permainos ar operatoriaus veiksmai (Elbadawy & Shehata, 2015). Šie neišvengiami krovinio svyravimai dažnu atveju nulemia krovos efektyvumo mažėjimą, konteinerio pažeidimus ar nelaimingus atsitikimus terminale (Liu, Zhao, & Cui, 2011). Nėgana to, krovos procesas reikalauja spartaus konteinerio transportavimo į reikiamą poziciją, tačiau kuo didesnis transportavimo greitis, tuo krovinyms labiau svyruoja, taip apsunkindamas operatoriaus darbą ir visą transportavimo procesą (Jaafar, Mohamed, Abidin, & Ghani, 2013; Jaafar, Sulaima, Mohamed, & Jamian, 2013). Krovinio svyravimai daro įtaką ir patyrusio operatoriaus darbui bei mažina griebtuvo pozicionavimo tikslumą. Norint pasiekti didesnį krantinės kranų griebtuvo pozicionavimo tikslumą, būtina diegti valdymo sistemą, kuri vertintų vežimėlio pagreitį ir svyravimų amplitudę.

1.4.1. Judesio profiliai ir valdymo sistemos

Vienas iš efektyviausių ir praktiškai pigiausių kaštais bei lengviausiai realizuojamų būdų valdymo efektyvumui bei krovos spartai gerinti yra judesio profilavimo metodų taikymas. Tačiau greitas judėjimas smarkiai paveikia judėjimo tolygumą ir sukelia išliekamuosius svyravimus.

Judėsio profilio valdymo teknikose ir kompromisinių parametų paieška tarp judėsio greičio ir išliekamųjų svyravimų atsiradimo ir jų dydžio yra vienas iš pagrindinių ir sudėtingiausių judėsio profiliavimo uždavinių, sprendžiamų automatinio valdymo sistemose (Rew, Ha, & Kim, 2009). Norint padidinti transportavimo našumą, reikia didinti vežimėlio judėjimo greitį, todėl būtina valdyti staigius pagreičio pokyčius, kurie sukelia didelės amplitudės pagreičio kaitą, literatūroje vadinamą trūktelejimu (angl. *jerks*).



1.2 pav. S-formos greičio profilis – gautas truktelėjimo apribojimais:

a) pozicija; b) greitis; c) pagreitis; d) truktelėjimas (Béarée, 2014)

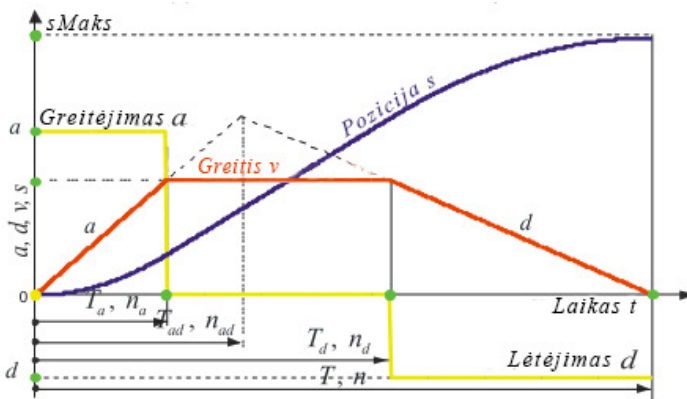
Fig. 1.2. S-shape velocity profile – obtained by jerk limitation:

a) position; b) velocity; c) acceleration; d) jerk; (Béarée, 2014)

Šie truktelėjimai gali būti valdomi naudojant jų apribojimo taisykles. Trūktelejimais apribotas judėsio profilis (1.2 paveikslas) yra pagrindinė judėsio projektavimo priemonė, moderniose judėsio valdymo sistemose. O taip pat tai yra optimalus sprendimas kūnų judesių valdymui. Trūktelejimo apribojimas yra

naudojamas svyravimų mažinimui, kurie atsiranda nuo užsaiduoto judesio proceso pobūdžio, kuris taip pat gali būti optimizuojamas (Béarée, 2014). Truktelėjimais apribotas judesio profilio integravimas į trapecinį greičio profilį įgalina valdyti greičio profilio projekcijas, išgaunant simetrinį ar asimetrinį S-formos greičio profilį (1.2 paveikslas). Judesio tolygumas naudojant S-formos profilį priklauso nuo truktelėjimo trukmės. Ilgesnis laiko periodas iki tol, kol truktelėjimas pasieks užsaiduotą reikšmę – didina valdomo objekto judėjimo tolygumą, bet mažina efektyvumą laiko atžvilgiu. Taigi atskiruose valdymo etapuose norint užtikrinti gerus S-formos profilio parametrus, būtina atlikti atitinkamus eksperimentinius tyrimus, siekiant nustatyti optimalius parametrus valdomai sistemai.

Trapecinis greičio profilis (1.3 paveikslas) yra pagrįstas trijų fazių pagreičio trajektorija (N. Sun, Zhang, Fang, & Yuan, 2012). Šio tipo metodas yra vienas iš dažniausiai naudojamų judesio valdymo technologijas, taikomų krantinės kranuose (N. Sun *et al.*, 2012; Ning Sun, Fang, Member, Zhang, & Yuan, 2011; Xuebo, Yongchun, Ning, & Mingwei, s.a.).

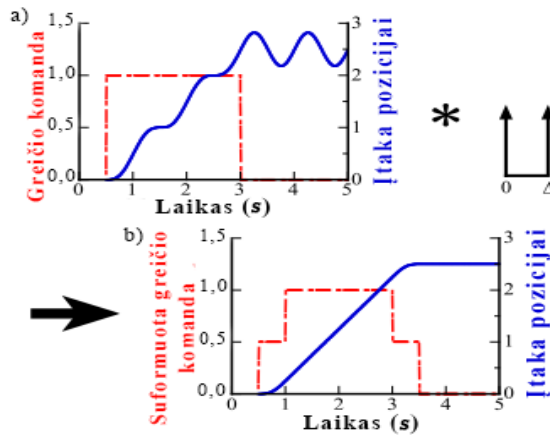


1.3 pav. Trapecinis greičio profilis – greičio, pagreičio ir pozicijos pokyčiai (Stoychitch, 2013)

Fig. 1.3. Trapezoidal velocity profile – changes of velocity, acceleration and position (Stoychitch, 2013)

Tačiau, begalinio truktelėjimo problema smarkiai apriboja šio profilio taisyklumą automatinio valdymo sistemose. Trijų fazių pagreičio valdymas mažina bendrąsias sistemos valdymo galimybes lyginant su modernesniu S-trajektorijos greičio profiliu (1.2 paveikslas). S-formos greičio profilis dažniausiai naudojamas siekiant pagerinti judėjimo tolygumą. Tai padaroma mažinant truktelėjimo vertę greitėjimo ir lėtėjimo fazėse. (Rew *et al.*, 2009; Z. Wu & Xia, 2014). Šio tipo judesio profilis yra grindžiamas septynių fazių pagreičio trajektorija, kuri yra valdoma keičiant truktelėjimo vertę. Truktelėjimo apribojimais valdomas judėjimo

profilis efektyviai mažina pagreitėjimo procedūros metu sužadintas vibracijas. Nevaldomų svyravimų mažinimui, visų pirma, yra naudojamas šio tipo judesio greičio profilis (Béarée, 2014), ir tik nepasiteisinus jo efektyvumui, pastarasis kombinuojamas su moderniomis valdymo technologijomis, tokiomis kaip PID valdiklis ar neraiškioji logika. Toks greičio profilio panaudojimas su kitomis valdymo technologijomis, kai profilis naudojamas įėjimo signalui formuoti, dar vadinamas įėjimo profiliavimu (Majid *et al.*, 2013). Daug mokslinių tyrimų buvo skirta šios valdymo technikos tyrinėjimams, ypačiai, kai pagrindinį vaidmenį joje atlieka įėjimo profiliavimas (Béarée, 2014; Elbadawy & Shehata, 2015; Majid *et al.*, 2013; Ngo, Nan, & Hong, 2012; Prof, Brock, Member, & Gniadek, s.a.; Vaughan, Yoo, Knight, & Singhose, 2013).



1.4 pav. Įėjimo profiliavimo procesas: a) nesuformuota komanda; b) suformuota komanda; (Vaughan *et al.*, 2013)

Fig. 1.4. Process of input shaping: a) unshaped command; b) shaped command; (Vaughan *et al.*, 2013)

Įėjimo profiliavimas mažina vibracijas, šiek tiek koreguodamas valdymo komandą per impulsų skaičių. Šis įėjimo profiliavimo procesas pavaizduotas 1.4 paveiksle. Jo generavimui naudojama dviejų impulsų seka vietoje vieno, taip gaunant vadinamąjį nulinės vibracijos profiliavimą.

Paveiksle pavaizduota vežimėlio pozicijos reakcija į impulsinį greičio poveikį. Kai impulsas yra tinkamai suformuotas, objektas juda be išliekamųjų svyravimų, taip kaip parodyta apatinėje paveikslo dalyje. Vienas iš pagrindinių įėjimo profiliavimo privalumų, lyginant su grįžtamojo ryšio valdymo sistemomis – nereikalingi papildomi jutikliai tam, kad būtų suformuotas valdymo signalas (Vaughan *et al.*, 2013).

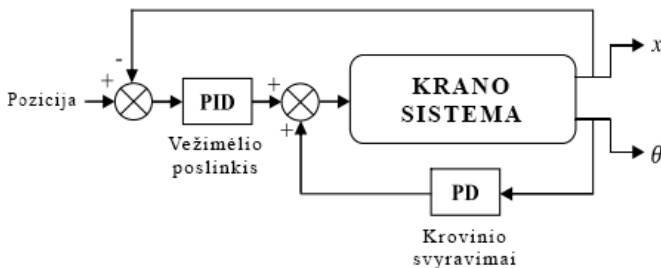
1.4.2. Konteinerių perkrovos proceso dinamikos modeliavimo ir valdymo metodai

Siekiant padidinti transportuojamo krovinio saugumą, kuriami nauji konteinerių krovos proceso dinamikos modeliavimo metodai. Jais siekiama geriau imituoti sistemos elgesį, esant skirtingoms krovos sąlygoms ir veiksniams (Bogdevicius & Vika, 2005; Ismail, Ahmad, Ramli, & Rashidi, 2009; Jaafar, Mohamed, Jamian, *et al.*, 2013). Vienas iš tokių tyrimų yra krantinės kranų judėjimo sistemos 3D dinaminis modeliavimas, kurį pristatė mokslininkas Ismail ir kiti (Ismail *et al.*, 2009). Skaičiavimams buvo naudojamas Lagrandžo metodas. Darbe buvo renkami ir analizuojami duomenys, gauti dinaminės sistemos imitacijos metu bei buvo fiksuojami vežimėlio pozicija ir griebtuvo svyravimo kampai. Mokslininko gauti rezultatai turi didelę reikšmę valdymo algoritmų, skirtų dvigubo griebtuvo krantinės kranų sistemoms valdyti, kūrimui ateityje. Jaafar su kitais mokslininkais (Jaafar, Mohamed, Jamian, *et al.*, 2013) sukūrė netiesinį krantinės kranų sistemos modelį, kuriame tyrinėjo veiksnius, veikiančius sistemos galimybes. Tyrimo metu buvo keičiama įėjimo įtampa, kabelių ilgis, apkrovos ir vežimėlio masės. Šios sistemos imitacijos rezultatai rodo, kad sistemos atsakas yra labai jautrus šių parametrų kombinacijoms. Taip pat mokslininkas nustatė, kad netinkamas parametrų parinkimas gali būti viena iš pagrindinių priežasčių, darančių įtaką konteinerių svyravimui ir keliančių krovinio saugumo užtikrinimo problemas transportavimo metu. Šio mokslininko gauti rezultatai yra svarbūs 3 skyriuje aprašyto valdymo algoritmo parametrų parinkimui, taip pat ir modernesnių valdymo algoritmų kūrimui ateityje.

Dauguma modelių, siejamų su dinaminio valdymu ir krovinio saugumo problemomis, yra pristatomi tik iš vienos pusės ir skirti tik vieno tipo problemai spręsti. Pavyzdžiui, kranų valdymo sistema su būsenos imitatoriumi (Tomczyk, Cink, & Kosucki, 2014), kuriame sukurtas dinaminis modelis yra skirtas spręsti problemas, susijusias tik su krovos operacijomis ir pozicionavimu, esant skirtingiems vėjo trukdžiams. Taip pat kito mokslininko (Cha, Roh, & Lee, 2010) sukurtas dinaminis modelis skirtas tik imituoti sunkių krovinių kėlimo procesui, naudojant plūduriuojančius kranus.

Norint padidinti krantinės kranų procesų automatizavimą, būtina spręsti problemas, susijusias su konteinerio svyravimais (Liu *et al.*, 2011). Kiekvienas atliktas tyrimas šioje srityje priartina prie intelektinio valdymo metodo sukūrimo ir pritaikymo realiuose krantuose, kaip pramoninę valdymo priemonę. Neraiškia logika grindžiamos valdymo sistemos nereikalauja itin tikslių matematinių modelių ar valdomo objekto detalių, o tokių sistemų pritaikomumas yra santykinai paprastas (Ranjbari & Shirdel, 2015). Tačiau sprendžiant kompleksinius valdymo uždavinius, aktualius krantinės kranų valdymui, vien tik šios moderniosios valdymo priemonės taikymas duoda nepakankamai aiškius ir efektyvius rezultatus visose situacijose, tam kad būtų galima jį taikyti praktiškai. Kaip vienas iš galimų

sprendimų modernios intelektinės krano valdymo sistemos kūrimui gali būti panaudotas neraiškiosios logikos kombinuotas valdymas taikant PID valdiklius (Yang, Zhang, & Zhao, 2008; Liu *et al.*, 2011; L. Wang, Zhang, & Kong, 2015). Tačiau pastarųjų metų rezultatai rodo, kad įėjimo profiliavimas, kartu su PID valdikliu duoda perspektyvius rezultatus (Elbadawy & Shehata, 2015; Majid *et al.*, 2013; Prof *et al.*, s.a.). Taigi krantinės krano valdymo sistemai buvo pasiūlyta net keletas valdymo technologijų, tam kad būtų realizuota autonominio uosto koncepcija. Tačiau, PID valdiklis pramonės perspektyvoje yra plačiausiai naudojamas dėl paprastos struktūros ir stabilaus veikimo įvairiomis sąlygomis (Z. Sun, Wang, Bi, & Zhao, 2015). Mokslininkas Liu (Liu *et al.*, 2011) sukūrė valdymo sistemą, kurioje panaudojo neraiškiają logiką ir PID valdiklį, skirtą valdyti ožinio krano krovinio transportavimo procesą. Mokslininkas pristatė pilną sistemą bei atlikto tyrimo rezultatus, kurie rodo, kad šių modernių valdymo technologijų kombinavimas duoda efektyvius rezultatus ir, galbūt, galėtų būti praktiškai realizuojami realiuose sistemose. Tačiau dauguma mokslininkų krantinės krano valdyme susiduria su PID valdiklio tinkamų parametų nustatymu. Tradiciniai parametų derinimo metodai, tokie kaip bandymų ir klaidų metodas yra vienas lengviausių būdų suderinti PID valdiklį, bet šiuo metodu gauti rezultatai negarantuoja reikšmingų ir efektyvių rezultatų (Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013; Wong, Tang, & Mailah, 2012a; Wong *et al.*, 2012b). Kitas valdiklio derinimo metodas tai Zinglerio-Nikolso (Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013), kuris yra plačiausiai taikomas dėl jo paprastumo. Atsižvelgiant į gautus rezultatus dėl agresyvumo ir didelių svyravimų perviršių skirtingais atvejais mokslininkai PID valdiklio parametų derinimui taiko ir kitus metodus.



1.5 pav. Vežimėlio valdymo algoritmo koncepcija
(Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013)

Fig. 1.5. The concept of trolley control algorithm
(Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013)

Dažniausiai naudojamas PID valdiklis kartu su kintančiais parametų parinkimo metodais grindžiamais optimizacijos technologijomis (Lv, Li, Li, & Hou,

2012). Vieni tokių, tai genetiniai PID parametrų nustatymo algoritmai, taikomi automatinėms kranų operacijoms vykdyti (Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013; Lv *et al.*, 2012), dirbtinės bičių kolonijos algoritmai, naudojami sumažinti staigius šuolius ar laiko parametrus (Li, Li, & Yang, 2012). Taip pat naudojami skruzdėlių kolonijos algoritmai, taikomi netiesinio PID valdiklio parametrams optimizuoti (Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013).

Mokslininkas Jaafar ne tik analizavo PID valdiklio technologijas kranų valdyme, bet ir taikė įvairiausias valdiklių kombinacijas. Šio mokslininko siūloma valdymo struktūra, kai kombinuojami PID ir PD valdikliai, pavaizduota 1.5 paveiksle. PID valdiklis naudojamas krantinės kranų vežimėlio pozicionavimui, o PD valdiklis naudojamas mažinti krovinio svyravimus. Valdymo modelio struktūra, kuri apjungia PID ir PD valdikius skirtingiems parametrų stebėti, yra taikoma įvairiose sistemose. Dažnu atveju PID valdiklis yra naudojamas pozicijos valdymui, o PD valdiklis – atsiradusių svyravimų mažinimui. Tačiau tokiam modeliui jau reikia derinti penkių parametrų vertes. Literatūroje dažnai pateikiama, kad tokio valdymo modelio valdiklio išėjimuose naudojama x pozicija ir θ svyravimų kampas.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Apžvelgiant mokslinę literatūrą ir atliktų tyrimų rezultatus nustatytos konteinerių krovos problemos – saugumas, nepakankama krovos sparta, kuri netenkina šiuolaikinių krovos apimčių, energijos švaistymas, valdymo algoritmų spragos arba trūkumai, nepilnai automatizuotas valdymas. Konteinerių saugumo ir spartos padidinimui mokslininkai siūlo skirtingas metodikas – konteinerių krovos kranų valdymo algoritmų optimizavimą, atskirų krovos operacijų analizę bei korekcijas, trajektorijų optimizavimą, konteinerio svyravimų mažinimo priemonių panaudojimą ir kitas.
2. Nustatyta, kad įdiegti išmaniuosius konteinerius nepakanka – turi būti sukurtas tarpusavyje bendraujančių išmaniųjų konteinerių mobilus tinklas.
3. Viena iš svarbiausių nesaugios krovos priežasčių – klaidingas operatoriaus darbas, todėl ateityje uostuose planuojama diegti autonominius intermodalinės krovos terminalus. Kita – konteinerio svyravimai krovos metu. Šių svyravimų priežastys įvairios – vėjo gūšiai, nelygus bėgių paviršius, operatoriaus veiksmai, laivo svyravimai, kranų judėjimas, netolygus paleidimas ar pavarų darbas ir kitos.

4. Nustatyti pagrindiniai krantinės kranų valdyme naudojami greičio kitimo profiliai – vienas populiariausių ir dažniausiai naudojamų – trapecinis, kitas – S-formos. Pranašesniu laikomas S-formos greičio kitimo profilis, dėl galimybės lanksčiai keisti vežimėlio įsibėgėjimo ir stabdymo trukmes.
5. Naujausiuose moksliniuose tyrimuose sprendžiamos konteinerių krovos spartos optimizavimo problemos jau esamose krantinės kranų valdymo sistemose. Mokslininkai siekia sumažinti krovos metu atsirandančius konteinerio svyravimus panaudodami uždaras, kelių grįžtamųjų ryšių, valdymo sistemas, su PID valdikliais ir kitomis valdymo technologijomis.

Išanalizavus Lietuvos ir užsienio šalių mokslinę literatūrą formuluojami disertacijos uždaviniai:

1. Konteinerių perkrovos metu atsirandančių dinaminį apkrovų imitacijai sukurti krantinės kranų mechaninius procesus aprašantį diferencialinių lygčių modelį, kuris būtinas programuojant kranų vežimėlio judėjimo greičio profilius, nustatant krovos svyravimų amplitudę, griebtuvo stabilizavimosi trukmę ir bendrą transportavimo ciklo trukmę.
2. Sukurti autonominio krantinės kranų, skirto konteinerių krovai, laboratorinį prototipą su sistema valdančiu išmaniuoju algoritmu, leidžiančiu eksperimentiškai patvirtinti teorines prielaidas.
3. Atlikti tyrimus, įrodančius, kad darbe atlikti skaičiavimai, sukurtas sumanysis valdymo algoritmas ir pasiūlyta konteinerių svyravimą slopinanti sistema yra našesnė ir spartesnė už žinomas. Eksperimentu įvertinti sukurtos sumanios valdymo sistemos efektyvumą, individualiam konteineriui pritaikant skirtingus greičio kitimo profilinius ir PID valdiklio parametrus.

2

Paskirstyto valdymo koncepcija ir krantinės kranų dinaminis modeliavimas

Šiame skyriuje nagrinėjami sumaniųjų konteinerių krovos procesui įtaką darantys veiksniai, elementai bei apribojimai, atsižvelgiant į krovos technologiją, technines galimybes ir susijusius procesus. Pateiktas sukurtas krantinės kranų riedmenų modelis bei rezultatai, leidžiantys vertinti kranų riedmenų nusidėvėjimo įtaką krovos procedūroms. Atsižvelgiant į pirmame skyriuje mokslininkų nagrinėjamas problematiką, pateiktas trumpas įvertinimas bei numatyti galimi sprendimai. Taip pat šiame skyriuje pateiktas krantinės kranų vežimėlio ir kėlimo mechanizmo matematinis modelis. Šis modelis sukurtas siekiant nustatyti startavimo procedūros įtaką krovos procesui bei įvertinti pereinamųjų procesų metu atsirandančius griebtuvų su kroviniu išliekamuosius svyravimus. Skyriuje gauti rezultatai įgalina daryti prielaidas bei įžvalgas krantinės kranų autonomiškumui užtikrinti, realizuojant sumaniausias valdymo technologijas, gebančias analizuoti situaciją visose krovos procedūrose.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Eglynas *et al.* (2012), Eglynas *et al.* (2013a), Eglynas *et al.* (2013b), Eglynas *et al.* (2014), Andziulis *et al.* (2015), Andziulis *et al.* (2016).

2.1. Krantinės krano paskirstyto valdymo sistemos koncepcija

Šių dienų konteineriniai krantinės kranai dažniausiai yra valdomi operatorių. Jiems tenka priimti sprendimus įvairiose situacijose, konteinerio kėlimo, nuleidimo bei transportavimo metu. Transportavimo procese yra keletas procedūrų, kuriose operatoriams tenka priimti sprendimus, bet nelaimingiems atsitikimams įtaką gali daryti ne tik jų veiksmai bei sprendimai. Krano, kurio valdymą atlieka automatinės sistemos, krovinio pažeidimai atsiranda dėl sistemos klaidų ar netikslių nuspėjimų bei įvertinamų išorinių poveikių. Tam, kad būtų išvengta kritinių situacijų, turi būti nuolatos kuriamos naudojamų algoritmų alternatyvos, bei tobulinamos taikant moderniąsias valdymo technologijas. Kai kuriais atvejais, vien tik programinės dalies patobulinimų nepakanka, todėl būtina diegti papildomus jutiklių modulius, taip papildant egzistuojančias valdymo sistemas.

Daugeliu atveju intermodalinio krantinės krano operatorius nežino, kas yra konteineryje ir negali tinkamai užtikrinti transportuojamo krovinio saugumo. Kartais perkraunant specifinius krovinius reikalingas itin didelis tikslumas, dėl galimo pavojaus konteinerio viduje esančiam kroviniui. Tokios ir analogiškos krovinių transportavimo situacijos reikalauja naujausių technologinių sprendimų diegimo intermodaliniuose terminaluose, siekiant užtikrinti didesnę krovinio saugumą automatizuojant krovos procesą. Tam, kad operatorius galėtų matyti krovinio saugumo lygį ar kitus reikiamus parametrus, galima taikyti radijo dažnio atpažinimo (RDA) žymes, taip sužymint ne tik specifinius, bet visus konteinerius (Bukkapatnam, Mukkamala, Kunthong, Sarangan, & Komanduri, 2009; Yin, Wang, & Zhang, 2008; Lukasik, 2011; W. Wu, Liu, Chen, Yang, & He, 2012). Tokios žymėjimo technologijos įgalina konteinerio savininkus priskirti priežiūros ir transportavimo taisykles kiekvienam atskiram konteineriui. Šios žymės galėtų būti nuskaitomos, naudojant specifinius RDA skaitytuvus visose krovos procedūrose, kad kiekvienas transportavimo objektas žinotų, kaip teisingai jį transportuoti.

Žinant pagrindinius krovinio parametrus (krovinių atsparumą smūgiams, temperatūrai ir pan.) galima kurti ir diegti valdymo algoritmus krantinės kranų autonomiškumui realizuoti, įgyvendinant pasaulinę autonominio uosto koncepciją. Tokia informacija įgalintų sukurti skirtingus valdymo algoritmus ar taikyti skirtingus valdiklio parametrus kiekvienam individualiam konteineriui, taip sumažinant pažeidimų riziką bei užtikrinant efektyvumą.

2.1.1. Sumaniojo konteinerio koncepcijos integravimas į autonominio krano valdymo sistemą

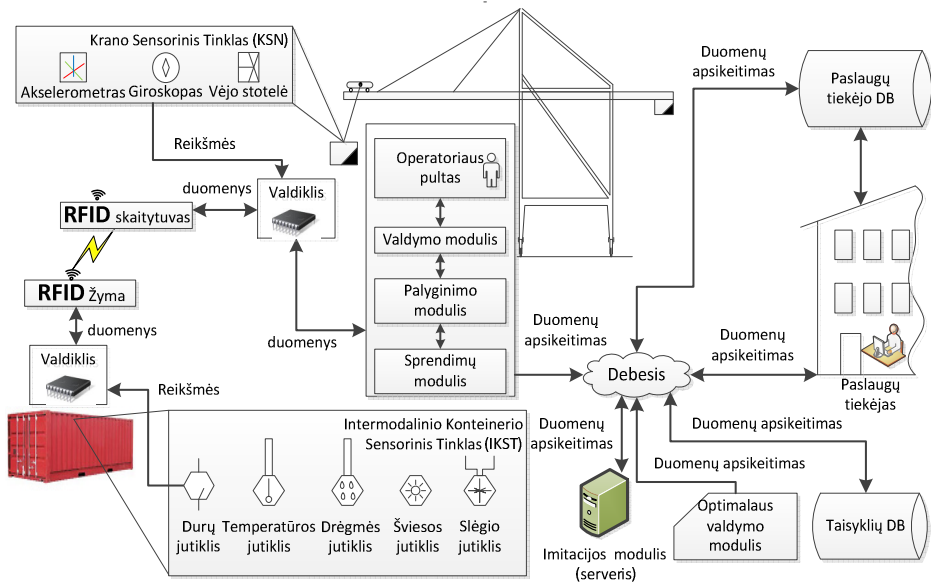
Šiai dienai, žinomose perkrovos proceso valdymo technologijose informacija apie konteineryje esantį krovinį yra neteikiama. Žinomas tik jo maršrutas – kur jis turi keliauti iš atvykusio laivo. Nepakankamas informacijos kiekis riboja naujų perkrovos technologijų pritaikymą. Sumaniojo konteinerio koncepcijos integravimas į autonominio krano valdymo sistemą suteiktų papildomos informacijos apie krovinio mechaninį atsparumą perkrovai, jo būseną ar papildomos informacijos apie kitus parametrus. Šios informacijos perdavimas per RDA technologiją suteiktų galimybę vykdyti specifinius perkrovos režimus kiekvienam individualiam konteineriui, taip didinant perkrovos ciklo saugumą.

Šių dienų konteinerių gabenimas per intermodalinius terminalus yra vykdomas konvejerio principu, kai yra balansuojama tarp greitos krovos ir rizikos pažeisti konteinerį. Krantinės kranas yra sudėtinga netiesinė valdymo sistema, kurioje net ir menkiausi veiksniai, aprašyti 1.2 poskyryje, gali sukelti krovinio pažeidimo riziką. Papildomos informacijos apie konteinerio atributus įtraukimas yra nepakankamas tam, kad sistema galėtų funkcionuoti autonomiškai. Siūlomoje krantinės krano valdymo koncepcijoje (2.1 paveikslas) įtraukiamas ir išorinės jėgos, galimai darysiančios įtaką krovos procesui. Virtualus krantinės krano modelis, skirtas transportavimo kelio projektavimui terminale. Šiame modelyje, atsižvelgiant į individualaus konteinerio parametrus, visas krantinės kranų krovos procesas turėtų būti imituojamas virtualioje aplinkoje, prieš pradėdant konteinerio transportavimo procesą. Esant didesniems nuokrypiams, kelias bei valdymo parametrai turėtų būti perskaičiuojami siekiant užtikrinti krovinio saugumą bei didinti krovos našumą. Siūlomoje koncepcijoje atsižvelgiama ir į griebtuvo padėtį bei jį veikiančias jėgas, todėl jutiklinis griebtuvo tinklas leis stebėti konteinerio transportavimo procesą ir lyginti jį su imitacijos rezultatais. Remiantis koncepcija, bet koks sistemos nuokrypis būtų analizuojamas bei priimami atitinkami sprendimai, kaip keisti transportavimo parametrus realiuoju laiku.

Ši koncepcija paremta paskirstytu valdymu, kurį sudaro keturios pagrindinės dalys, pavaizduotos 2.2 paveiksle. Be valdymo sistemos modelyje numatytas ir jutiklinis tinklas bei duomenų apsikeitimo sistema, grindžiama debesų kompiuterija. Nagrinėjamu atveju jutiklinis tinklas apjungia du objektus – tai jutikliai sumontuoti konteineryje bei jutikliai, stebintys krano veiksmus. Koncepcijoje taikomi trys pagrindiniai krantinės krano jutikliai: akselerometras, giroskopas ir vėjo stotelė. Be šių jutiklių dar yra ir galinių padėčių jutikliai, atstumo nustatymo jutikliai bei krovinio svėrimo mechanizmas. Visas šis krano jutiklinis tinklas skirtas krano operacijų stebėjimui ir duomenų rinkimui. Surenkami duomenys realiu laiku siunčiami atitinkamiems moduliams, kuriuose vyksta tolimesnis jų apdorojimas.

Vienas iš tokių, tai optimalaus valdymo modulis, kuris tikrina ar transportuojamas krovinys juda teisinga trajektorija ir teisingais parametrais. Jis tai daro tam tikrame laiko intervale nuskaitydamas krovinio koordinatas. Kiekvienam laiko momentui skaičiavimai atliekami iš naujo.

Šiame modulyje atliekami skaičiavimai ir tikrinama ar krovinys neišeina už optimalios trajektorijos ribų. Kitas labai svarbus sistemos elementas tai imitacinis modulis. Šis modulis įgalina teoriškai įvertinti ir prognozuoti galimas krovinio trajektorijas bei svyravimus. Turint pradinis duomenis imitacija gali būti atlikta dar iki tol, kol veiksmas įvyksta. Tai padės transportavimo proceso saugumo užtikrinimui. Kadangi paėmimo metu konteineriai yra skirtinguose taškuose, kiekvieną kartą yra nustatomos naujos pradinės sąlygos.

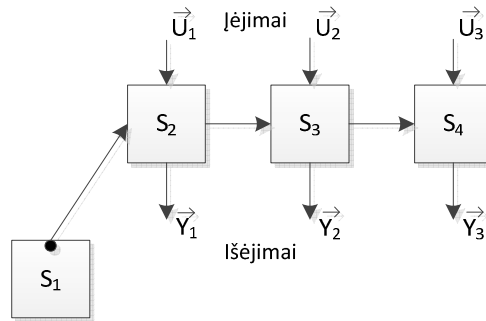


2.1 pav. Paskirstyto dinaminio valdymo koncepcinis modelis grindžiamas jutikliniu tinklu ir optimaliu valdymu

Fig. 2.1. The concept of disturbed dynamic control model based on sensor network and optimal control

Kiekvienam krovy procesui būtina imituoti naują situaciją. Taip pat situacija gali kisti ir krovy proceso metu. Jei krovinys yra veikiamas išorinių jėgų, dėl kurių jo judėjimo trajektorija kinta, atsiranda poreikis spręsti krovinio stabilizavimo uždavinius. Pavyzdžiui, jei stipriai padidėjo vėjas, jutiklinis tinklas persiunčia matavimų rezultatus krano valdymo moduliui, kuris, palyginęs galimas reikšmes ir esant nuokrypiui, kreipiasi į imitacijos modulį, kad šis paskaičiuotų galimą

naują trajektoriją, pagal kurią reikia vertinti nuokrypius. Imitacijos modulis dirba savarankiškai, todėl esant bet kokiems parametų pokyčiams krovos proceso metu imitacija iš naujo pateikia naujus rezultatus palyginimo moduliui.



2.2 pav. Krantinės kranų dinaminio valdymo sistema (S – sistema, U – dinaminės būsenos vektorius, Y – apribojimų vektorius)

Fig. 2.2. Dynamic control system of quay crane (S – system, U – vector of dynamic state, Y – vector of limitations)

2.2 paveiksle S_1 – sistema su kroviniu ir griebtuvo mechanizmu. Čia griebtuvo mechanizmas sistemoje yra valdomas tik iš dalies, tai galimybė sugriebti ir paleisti krovinį (nėra kreipiančiųjų valdymo mechanizmų). Kadangi griebtuvas kabo ant lynų, jo stabilumą tiesiogiai valdyti būtų sudėtinga, todėl tiesioginių būsenų bei apribojimų šioje sistemoje nėra. S_2 – tai krovinio kėlimo mechanizmas. Šiam mechanizmui taikomi apribojimai. Taip galima kontroliuoti jo būseną, reguliuoti krovinio aukštį. Sistemoje varikliai daro tiesioginę įtaką krovinio padėčiai. S_3 – tai vežimėlis, kuris transportuoja krovinį iš pradinio taško į galinį tašką. S_3 sistema, veikdama kartu su S_2 , leidžia krovinį transportuoti plokštumoje. S_4 – kranų bendra judėjimo sistema, kurią aktyvavus tiesiogiai įtakojamas krovinio judėjimas erdvėje.

Apribojimai taikomi kiekvienam individualiam krantinės kranui. Taip yra todėl, kad kiekvienas krantinės kranas yra gaminamas pagal krovos kompanijos užsakymus ir jų apribojimai arba specifikacijos skirtingos. Palyginimui pasirinktas Klaipėdos „Smeltė“ konteinerių terminalo kranas, o kaip tyrimo objektas – laboratorinis kranų prototipas, kuris buvo sukurtas remiantis pagrindiniais apribojimais. Šie apribojimai pateikti 2.1 lentelėje.

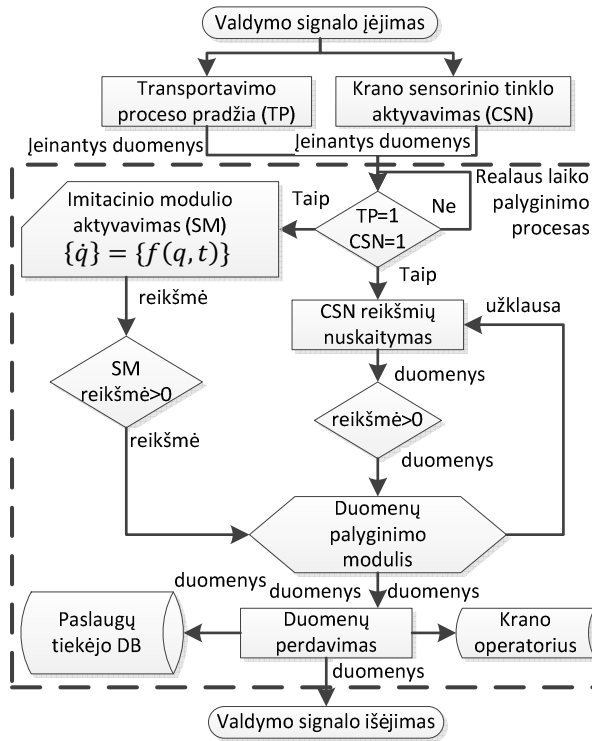
2.1 lentelė. Klaipėdos „Smeltė“ krantinės kranų apribojimai (techniniai duomenys)
Table 2.1. The quay crane limitations at Klaipėda “Smeltė” (technical data)

Apribojimai	Klaipėdos „Smeltė“ kranų vertės	Laboratorinio prototipo vertės
<i>Keliamoji galia, kg</i>		
Griebtuvo	65 000	~ 6
Kėlimo mechanizmo	70 000	~ 7
<i>Griebtuvo kėlimo greičiai, m/min</i>		
Kėlimo greitis (su didžiausia apkrova)	90	~0,9
Kėlimo greitis (tuščio griebtuvo)	180	~1,8
<i>Kita</i>		
Vežimėlio judėjimo greitis, <i>m/min</i>	180	~1,8
Vežimėlio judėjimo atstumas, <i>m</i>	~96	~0,9
Kranų rėmo judėjimo greitis, <i>m/min</i>	45	~0,4
Kranų rėmo judėjimo atstumas, <i>m</i>	~480	1,5
Strėlės pakėlimo laikas, <i>min</i>	5	nesikelia
Griebtuvo minimalus aukštis (nuo viršaus iki bėgių), <i>m</i>	~11,1	~0,1
Griebtuvo maksimalus aukštis (nuo viršaus iki bėgių), <i>m</i>	~59,1 m	~0,8

Kaip matome apribojimų palyginimo 2.1 lentelėje, didžioji dalis laboratorinio fizikinio modelio parametrų turi santykį 1:100. Įvertinus parametrus, kurie netenkina šio santykio, bus galima daryti prielaidas paremtas skaičiavimais bei tyrimais atliktais su krantinės kranų laboratoriniu prototipu.

2.1.2. Realus laiko duomenų apsikeitimas sistemoje

Siūlomoje koncepcijoje krantinės kranų valdymo sistema yra paskirstyta – kiekvienas sistemoje esantis modulis dirba savarankiškai, todėl galima efektyviau išnaudoti atskirų modulių operacijas. Šiuo atveju, galima atlikti papildomą situacijos vertinimą transportavimo saugumui užtikrinti. Žemiau pateikiama duomenų palyginimo modulio veikimo algoritmo blokinė schema (2.3 paveikslas).

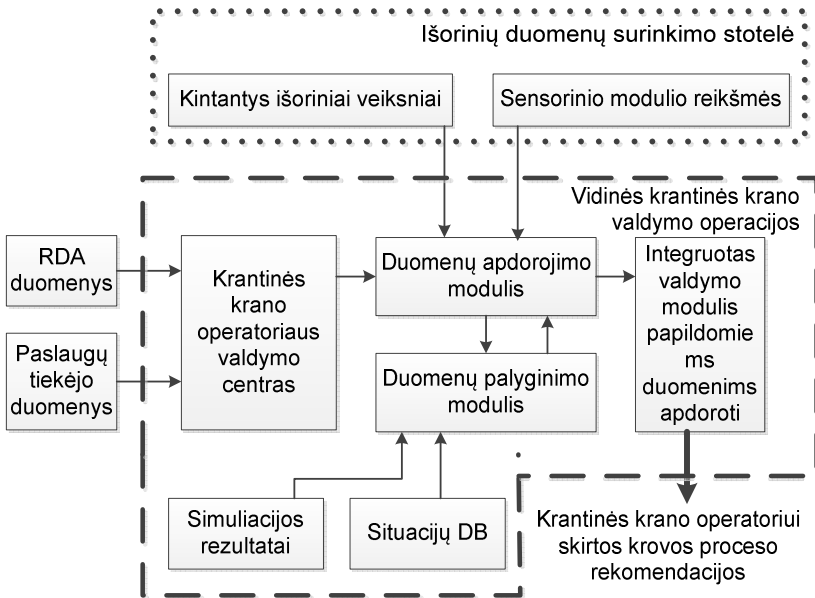


2.3 pav. Realaus laiko duomenų palyginimo modulio blokinė schema
 Fig. 2.3. The algorithm for real time data comparison module

Šiame 2.3 paveiksle pavaizduotas algoritmas atlieka griebtuvo su kroviniu pozicijos palyginimą realiuoju laiku. Krantinės kranui pradėjus transportavimo procesą, patikrinama ar jis jau pradėtas, ir ar veikia kranas jutiklinis tinklas. Jei abi užklausos duoda teigiamą rezultatą, valdiklis aktyvuoja imitacinį modulį bei realiu laiku nuskaityti duomenis iš jutiklinio tinklo. Nuskaityti duomenys bei imitacijos rezultatai persiunčiami to palyginimo moduliui. Pastarasis, apdorojęs duomenis, persiunčia juos į aptarnaujančios krovos kompanijos duomenų bazę bei perduoda kranas operatoriui. Taip pat, tolimesniems veiksams atlikti palyginimo duomenys perduodami centriniam krantinės kranas valdymo moduliui, kaip išėjimo valdymo signalas. Modulis pagal aprašytas taisykles koreguoja vežimėlio judėjimo ar griebtuvo kėlimo greitį.

2.1.3. Sumaniojo konteinerio komunikavimas per radijo dažnio atpažinimo technologiją

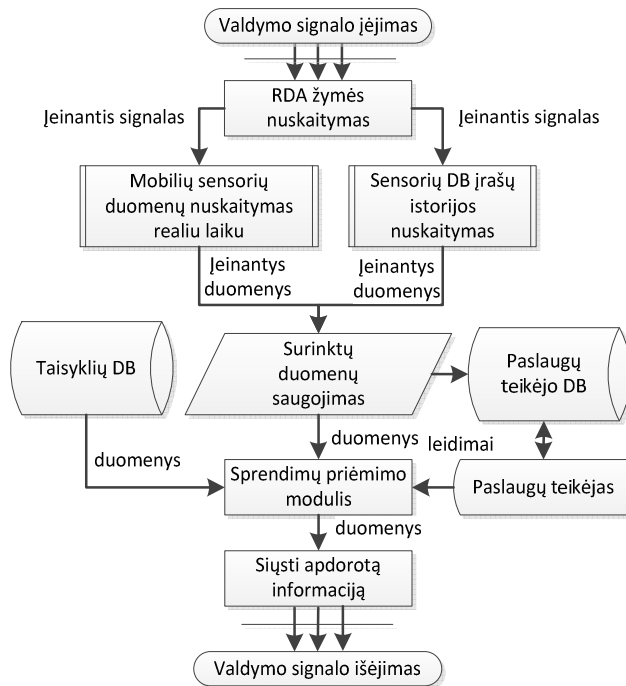
Realizuojant sumaniųjų konteinerių ir autonominio uosto koncepciją, pagrindinė priemonė yra aktyvi RDA žymė, sujungta su mobiliais jutikliais, kurie sumontuoti standartiniame intermodaliniame konteineryje. Sumontuoti jutikliai gali registruoti įvairius parametrus – konteinerio durų atidarymą, vidaus temperatūrą, drėgmę ar kitus. Valdymo sistema, kuri skaito RDA žymes, vertina konteinerio surinktus duomenis kiekvienos konteinerių krovos metu ir registruoja galimus pažeidimus bei informuoja apie juos konteinerio savininką. Žemiau pateikiama duomenų srautų koncepcija transportavimo metu naudojant aktyvias RDA žymes (2.4 paveikslas).



2.4 pav. Duomenų srautų paskirstymo konteinerio transportavimo procese koncepcija

Fig. 2.4. The concept of data flow distribution during container transportation process

RDA technologija yra kaip viena iš galimų priemonių, sudarančių sąlygas efektyviai surinkti duomenis apie krovinį ir duomenis iš konteinerio jutiklinio tinklo tam, kad būtų užtikrintas krovinio saugumas bei parenkami optimalūs transportavimo parametrai.



2.5 pav. Duomenų nuskaitymo algoritmas (T – temperatūros jutiklio duomenys, H – drėgmės jutiklio duomenys, P – slėgio jutiklio duomenys, L – šviesos jutiklio duomenys, D – durų jutiklio duomenys, DB – konteinerių duomenų bazė).

Fig. 2.5. Ddata reading algorithm (T – temperature sensor data, H – humidity sensor data, P – pressure sensor data, L – light sensor data, D – door sensor data, DB – data base of containers).

Krantinės krano operatorius konteinerio paėmimo metu gauna informaciją apie krovinį, nuskaitydamas individualaus konteinerio parametrus naudojant RDA technologiją (2.5 paveikslas). Atsižvelgiant į nuskaitytą informaciją, operatorius ar atitinkama valdymo sistema gali parinkti optimalius transportavimo algoritmo parametrus. Taip pat ir terminalo administracija gali pateikti atitinkamus transportavimo kriterijus, į kuriuos būtina atsižvelgti. Pridedant papildomų jutiklių siunčiamus duomenis ir realiu laiku fiksuojamas vertes, krovos procesas gali būti efektyvesnis, kadangi papildomų jutiklių siunčiami duomenys suteikia informaciją apie dabartinę konteinerio poziciją ar oro sąlygas. Krano operatorius turėdamas šią informaciją, gali geriau pritaikyti valdymo veiksmus.

RDA duomenų nuskaitymas prasideda, kai intermodalinio krantinės krano griebtuvo mechanizmas priartėja prie konteinerio. Konteineryje sumontuota RDA

žymė savyje talpina ne tik informaciją apie konteineriuję esantį krovinį, jo tipą, rūšį bei pagrindines charakteristikas, bet ir kaupia jutiklių parodymų istoriją. Taip pat turi galimybę nuskaityti jutiklis duomenų perdavimo momentu. Tokiu būdu gaunami realiu laiku esantys jutiklių parametrai. Krantinės krano griebtuve esantis RDA nuskaitymo įrenginys gauna signalą iš RDA žymės, kuri yra pasiruošusi perduoti duomenis. Šis signalas aktyvuoja RDA posistemės valdymo algoritmą, kuris pradeda duomenų nuskaitymą iš konteineriuję įmontuotos RDA žymės. Šis kreipiasi į savo duomenų bazę, iš kurios yra nuskaityti duomenys (konteineriuję esančio krovinio tipas, kategorija, rūšis bei sukaupti jutiklių duomenys). Tuo pat metu valdiklis siunčia užklausą jutiklių moduliams, iš kurių yra nuskaityti duomenys realiu laiku. Po duomenų nuskaitymo vyksta tikrinimas ar visi parodymai nuskaityti – jei ne, tada klaidingus parodomus turinčio jutiklio duomenys nuskaityti dar kartą. Tuo pat metu persiunčiama ir kita sukaupta informacija apie konteinerį.

Gavus visus reikalingus duomenis iš konteinerio, panaudojant RDA technologiją, krantinės krano duomenų nuskaitymo modulis patalpina visą informaciją savo duomenų saugykloje. Taip pat ši informacija persiunčiama paslaugų teikėjui. Tai reiškia, kad paslaugų teikėjas turės informaciją apie konteinerio temperatūrą, drėgmę, slėgį, šviesumą konteinerio viduje, durų statusą ir visą informaciją apie konteinerį, kuri prieš tai buvo patalpinta duomenų bazėje (duomenų istorija, krovinio informacija). Kitame žingsnyje visa informacija siunčiama į sprendimų priėmimo modulį, kuriame bus priimamas sprendimas dėl tolimesnių veiksmų, kurie bus atliekami su konteineriu. Sprendimų modulis gauna informaciją iš taisyklių duomenų bazės bei leidimus iš krovos paslaugų teikėjo. Jei gauti duomenys sutampa su aprašytais taisyklėmis bei gaunami atitinkami automatiniai leidimai iš paslaugų teikėjo, sistema persiunčia dalį informacijos gautos iš RDA žymės krano operatoriui. Esant nesutapimams sprendimus priima operatorius. Šiuo atveju, krano operatorius gauna informaciją apie krovinio tipą. Krovinio tipas nulemia, kokie bus transportavimo algoritmo parametrai. Toliau informacija perduodama valdymo signalo pavidalu tolimesniam proceso vykdymui.

2.2. Krano riedmenų techninių parametrų įtaka krovos procesui

Nuo pirmo krantinės krano atsiradimo (maždaug prieš 60 metų) krantinės kranai iki šios dienos yra technologiškai stipriai patobulėję (Oguamanam, 2006). Didėjant konteinerinių laivų dydžiams, pasikeitė ir kranų konstrukcijos bei techninės charakteristikos – dydis, sumažėjęs krovinio transportavimo laikas ir padidėjęs krovos proceso našumas. Visų šių pokyčių priežastis – nuolatos augantys tarptau-

tinių krovinių srantai ir sparčiai tobulėjanti intermodalinių krovos paslaugų infrastruktūra uostuose. Augantys intermodalinių konteinerių srantai reikalauja nuolatinių uosto plėtros darbų bei intermodalinio transporto technologinio tobulinimo uostuose (Juang & Roe, 2010). Ne išimtis ir krantinės kranai, kurie per pastaruosius keletą metų technologiškai stipriai patobulėjo. Pasikeitė ne tik kranų dydis, bet patobulėjo ir jų valdymo, stebėjimo ir kitos technologiškai svarbios sistemos. Kai kuriuose moderniausiuose pasaulio uostuose pradėtos sparčiai diegti sudėtingos krovos procesus apdorojančios sistemos bei įvairaus pobūdžio valdymo algoritmai. Keičiantis laivų dydžiams pasikeitė ir kranai, jie tapo didesni, masyvesni ir stipresni savo galimybėmis (Georgijević, 2010).

Konteineris yra pagrindinė priemonė, naudojama intermodaliniame transportavime, o populiarius jo transportavimo būdas – laivai. Konteinerių dydžiai ir jų galimybės yra aprašyti ISO standartais (Yin *et al.*, 2008; Y. W. Y. Wang, Ru, Jia, Chen, & Wang, 2008). Kasmet intermodaliniuose terminaluose yra perkraunama milijonai įvairaus tipo konteinerių, o vienas iš pagrindinių transporto objektų, naudojamų intermodalinio transportavimo metu, kai reikia krauti iš laivo į sunkvežimius ir atgal į laivą, yra didieji krantinių kranai (Yoke *et al.*, 2011). Taigi galima teigti, kad perkrovimo procesas yra vienas iš svarbiausių intermodalinių transportavimo mazgų, kuriame būtina užtikrinti aukštą saugumo lygį tiek fiziškai, tiek iš techninės bei programinės pusių. Klaidingi operatoriaus veiksmai ar netinkamas algoritmas gali ne tik pažeisti konteinerius ar jame esančius krovinius, bet ir sužaloti terminalo darbuotojus ar sugadinti kitus netoli krantinės kranų esančius transporto objektus (konteinerių keltuvus, sunkvežimius, infrastruktūrą). Dėl saugumo reikalavimo pažeidimų gali nutikti avarijos arba techninė katastrofa – krantinės kranų nuvirtimas ar strėlės nulūžimas. Tam, kad būtų išvengta panašių įvykių, mokslininkai nuolat atlieka matematinius skaičiavimus ir kuria dinaminis modelius, įvertindami vis naujus veiksnius, kurie įtakoja saugumo reikalavimų neatitikimus (Bukkapatnam *et al.*, 2009; Knight, Becerra, Holderbaum, & Mayer, 2012; Park & Kwon, 2010).

Pastaraisiais metais mokslininkai bando išspręsti konteinerio svyravimų problemą. Konteinerio kėlimo mechanizmas su konteinerio kranu yra sujungtas metaliniais lynais. Dėl skirtingų konteinerių svorių, vėjo gūsių ir valdymo algoritmų, konteineris dažnai pradeda siūbuoti (Kawai *et al.*, 2008). Todėl prireikia daugiau laiko tam, kad konteineris nukeliautų iš pradinio taško į galinį tašką. Nėgana to, dėl kintančių pagreičių atsiranda tikimybė, kad konteineris gali būti pažeistas, atsitrenkus į krantinės kranų konstrukcijas. O esant stipriam vėjui, krantinės kranai dažniausiai nekrauna. Nuo to kenčia ne tik terminalas, bet ir laivybos kompanijos, kurioms tenka laukti ištisas valandas, kol bus atnaujintas terminalo darbas. Visa tai remiasi į pinigus. Kiekviena prastova uoste laivui ir nedarbingumo sąlygos terminalui atneša papildomus nuostolius. Viso šito stengiamasi, išvengti kuriant techninius ir programinius sprendimus.

Tačiau konteinerio svyravimų žadinimo priežasčių yra ir daugiau. Tai operatoriaus veiksmai, šoninis vėjas, kranų konstrukcinės savybės, kranuose sumontuoti techniniai įrenginiai, varikliai, jų pereinamieji procesai ir natūralus įrenginių bei įrangos nusidėvėjimas. Vis šie veiksniai daugeliu atvejų yra nenagrinėjami kompleksiskai arba kaip atskiros laboratorinių sistemų dalys (Kawai, Choi, Kim, & Kubota, 2009). Tačiau net ir nereikšmingas nusidėvėjimas gali būti daugelio atsirandančių svyravimų priežastimi. Krano pagrindinių riedmenų sistema taip pat įtakoja svyravimus ir gali būti vertinama kaip viena iš galimų svyravimų atsiradimo priežasčių. Variklių inicijuojamos vibracijos, sukeltos pereinamųjų procesų metu, persiduoda ir visai krano sistemai. Siekiant patvirtinti šį teiginį, toliau darbe aprašytas sukurtas matematinis krano pagrindinių riedmenų matematinis modelis bei atliktas startavimo procedūros imitavimas.

2.2.1. Matematinis krano riedmenų modeliavimas

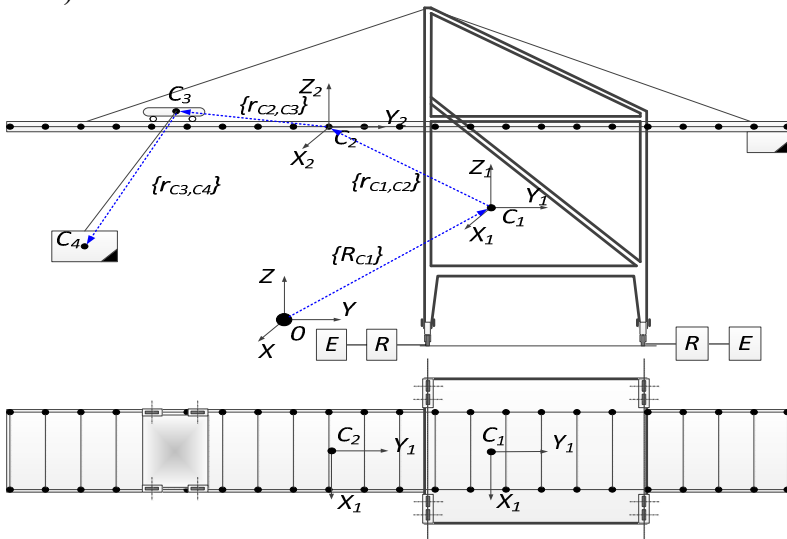
Krantinės kranas yra vienas iš sudėtingesnių dinamiškai kintančių objektų (Ngo *et al.*, 2012; Xu, Gu, Shen, Chu, & Niu, 2011), kurių įvairios problemos bei tinkamų parametrų parinkimo metodai yra nagrinėjami iki šių dienų. Mūsų nagrinėjamu atveju labai svarbu nustatyti ratų, transmisijos, bėgių nelygumo įtaką konteinerio kėlimo mechanizmui. Įvairūs transportavimo procesui įtaką darantys veiksniai gali sukelti nepageidaujamus konteinerio svyravimus. Ši problema ap sunkina krovos procesą, kadangi išsibalansuoja krovos algoritmai, įsijungia žmogiškasis faktorius, ir padidėja klaidos tikimybė. Dėl to gali būti pažeistas konteineris ar jo krovynys. 2.6 paveiksle pateikiamas krantinės krano modelis, kuris bus naudojamas tolimesniems skaičiavimams.

Pateiktame modelyje C_1 yra pirmo objekto masių centras. Čia priimama, kad visas laikantysis krano korpusas yra statinis objektas su savo masių centru. Taip yra todėl, kad šiuose skaičiavimuose jo jungiamieji parametrai yra tik papildomi. Priešingu atveju jie tik apsunkintų mūsų uždavinį. C_2 – tiriamosios sistemos antrojo objekto (strėlės) masių centras, C_3 – konteinerio transportavimo mechanizmo, o C_4 – konteinerio masių centrai. Nulinė koordinačių ašis rodo bendrąsias sistemos koordinates. Jų atžvilgiu mes stebėsime kūnų pokyčius, kuriuos mes nustatysime išvedę vektorius $\{R_{C_1}\}, \{r_{C_1}, r_{C_2}\}, \{r_{C_2}, r_{C_3}\}, \{r_{C_3}, r_{C_4}\}$. Tam, kad tinkamai būtų įvertinamos konteinerių svyravimų priežastys, reikia įvertinti ir visų krano ratų judėjimo įtaką konteineriui.

Sudarytas krantinės krano matematinis modelis, kuriame įvertinama krantinės krano rato ir bėgio nelygumai vertikalia ir horizontalia kryptimi, krano strėlės deformacijos bei krano mechanizmų transmisijų dinamika. Krantinės krano judėjimo lygčių sistema turi tokį pavidalą:

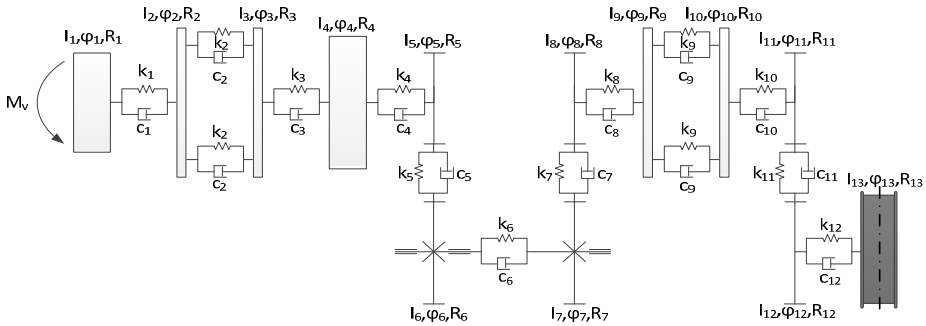
$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(q, \dot{q}, t)\}, \quad (2.1)$$

čia $[M]$ – krano masių matrica, $[C]$ – slopinimo matrica ir $[K]$ – standumo matrica, $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ – krano apibendrintų poslinkių, greičių ir pagreičių vektoriai, $\{F(q, \dot{q}, t)\}$ – netiesinis apkrovimo vektorius. Panašų krano judėjimo dinaminį modelį naudojo Nenad Zrnić su bendraautoriais (Zrnić, Oguamanam, & Bošnjak, 2006), o artimiausias modelis sukurtas Yang Pan su bendraautoriais (Pan, Liang, & Liu, 2011).



2.6 pav. Krantinės krano dinaminis modelis
Fig. 2.6. Dynamic model of quay crane

Dinaminio modelio sudarymas yra pirmasis ir labai svarbus, bet kokios virpamosios sistemos virpesių tyrimų ir skaičiavimų etapas. Nuo modelio struktūros ir sudėtingumo priklauso visa tolesnė virpesių tyrimo eiga ir gauti rezultatai. Virpamosios sistemos dinaminio modelio sudėtingumas priklauso nuo dviejų pagrindinių objektyvių veiksnių: pačios sistemos sudėtingumo ir informacijos, kurią norima gauti išnagrinėjus tą sistemą. Be to, dinaminio modelio sudėtingumas ir struktūra priklauso ir nuo asmens, sudarančio šį modelį, kvalifikacijos, turimos informacijos, virpesių teorijos ir jos fizinės prasmės suvokimo (Daqaq, Masoud, & Nayfeh, 2005; Oguamanam, 2006). Kuo sudėtingesnis tiriamasis objektas, tuo sudėtingesnė ir jo virpesius atspindinti virpamoji sistema bei dinaminis modelis. Kai tampriųjų arba slopinimo elementų charakteristikos netiesinės, dinaminis modelis būna daug sudėtingesnis.



2.7 pav. Krantinės krano pagrindinių riedmenų dinaminis modelis
 Fig. 2.7. Dynamics model of quay crane main wheels mechanism

Krantinės krano pagrindinių riedmenų modelyje I_n – kūno masių inercijos momentai, ϕ_i – kampai, R_n – spinduliai, M_v – variklis, k_n – standumo ir C_n – pasipriešinimo koeficientai. Krantinės krano transmisijos judėjimo lygčių sistema yra randama kiekvienam (2.7 paveikslas) ratui pagal transmisijos judėjimo lygtis.

$$\{\dot{X}_{tr}\} = [A_{tr}]\{X_{tr}\} + \{F_{tr}\}, \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} \{X_{tr}\} &= [M_{v2}], \{q\}^T, \{\dot{q}\}^T \\ \{\dot{q}\}^T &= [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_{13}], \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$[A_{tr}] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & 0 & E \\ A_{13} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}, \tag{2.4}$$

čia matricos $[A_{12}] = 0$, $[A_{13}] = [-c_v \quad 0 \quad \dots \quad 0]$, $[A_{32}] = [M_{tr}]^{-1} [K_{tr}]$, $[A_{33}] = [M_{tr}]^{-1} [C_{tr}]$, kuriose c_v , d_v , ω_0 – elektrinio asinchroninio variklio parametrai, $[M_{tr}]$ – transmisijos masės, $[K_{tr}]$ – transmisijos standumo, $[C_{tr}]$ – transmisijos slopinimo matricos ir $\{F_{tr}\}$ – apkrovos vektorius:

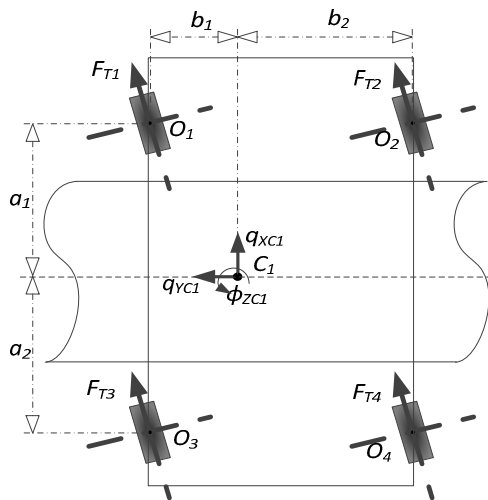
$$\{F_{tr}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ [M_{tr}]^{-1} \{f_{tr}\} \end{Bmatrix}. \tag{2.5}$$

Prispaudimo jėgos į krano ratus kairėje ir dešinėje pusėje nevienodos (priklauso nuo to, kurioje vietoje yra transportuojamas krovinys), todėl krano vežimo mechanizmo matematinis modelis tiek kairiajai pusei, tiek dešiniajai sudaromas

atskirai, siekiant tiksliau įvertinti sistemos įtaką transportavimo procesui. Modeliuojant mechatroninių sistemų dinامينius procesus, reikia tiksliai įvertinti trinties jėgas. Atsiradus trumpalaikiams tarpeliams, keičiasi tarpusavyje sąveikaujančių kūnų sąveikos jėgos. Todėl gali staigiai pakisti kūnų judėjimo dinamika. Kontaktuojant dviem kūnams, sąveikos jėgos priklauso nuo kūno paviršiaus geometrijos, kūno fizinių ir mechaninių savybių. Be to, kontaktuojant jėgoms būdinga histerezė, t. y., kontaktas priklauso nuo kontaktuojančių kūnų suartėjimo greičio krypties. Dažniausiai dviejų sąveikaujančių kūnų kinematika įvertinama greičių atstatymo koeficientu. Taigi krantinės krano judėjimo lygtys yra:

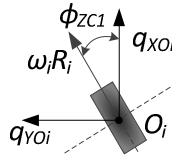
$$[M_{crane}]\{\ddot{q}_{crane}\} = \{Q_{crane}(q_{crane}, \dot{q}_{crane}, t)\}, \quad (2.6)$$

čia $\{q_{crane}\}$ – apibendrintų poslinkių vektorius, $\{Q\}$ – apibendrintų jėgų vektorius.



2.8 pav. Krantinės krano pagrindinių krano ratų nuokrypiai
Fig. 2.8. The quay crane wheels deviations

Mechatroninių sistemų dinaminio modeliavimo procese būtina tiksliai įvertinti trinties jėgas. Atsiradus tarpams ar trikdžiams, sąveikos jėga tarp dviejų kūnų keičiasi. Šie trikdžiai gali daryti įtaką kūno judėjimo dinamikai (2.8 paveikslas). Čia F_m – traukos jėgos. Sąlyčio vietoje veikiančios jėgos tarp dviejų kūnų priklauso nuo geometrinių, fizikinių ir mechaninių savybių (2.10 paveikslas).



2.9 pav. Krantinės krano rato slydimo kampas ir kryptis
Fig. 2.9. The quay crane wheel slip angles and directions

Krantinės krano ratų nuokrypis judėjimo trajektorijos atžvilgiu yra veikiami jėgų, veikiančių tarp rato ir bėgio. Krano judėjimo metu sankirtoje su ratais, tam tikru momentu, keičiasi judėjimo kryptis (2.9 paveikslas) ir atsiranda atitinkamas nuokrypio kampas ϕ_{ZC1} nuo pagrindinės judėjimo krypties. Tačiau dėl įvairių kreipiančiųjų sistemų šis nuokrypis daugeliu atvejų būna nežymus. Tačiau menkiausi sistemos judėjimo pokyčiai gali daryti įtaką konteinerio transportavimo procesui. Išilginis ir šoninis slydimas tarp ratų ir bėgio priklauso nuo rato sąlyčio su bėgiu ir krano judėjimo greičio. Išilginis krano rato slydimo greitis gali būti suskaičiuotas taip:

$$V_{sx_i} = \dot{q}_{xoi} - R_i \omega_i \cos \phi_{ZC1} \approx \dot{q}_{xoi} - R_i \omega_i. \quad (2.7)$$

Šoninis krano ratų slydimo greitis bendru atveju gali būti užrašomas taip:

$$V_{sy_i} = \dot{q}_{yoi} - R_i \omega_i \sin \phi_{ZC1} \approx \dot{q}_{yoi} - R_i \omega_i \phi_{ZC1}. \quad (2.8)$$

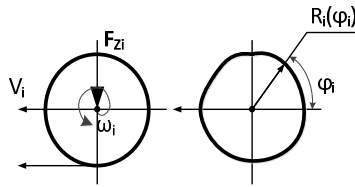
Išilginis V_{sx_i} ir šoninis V_{sy_i} , slydimai yra skaičiuojami atskirai kiekvienam krano ratui. Krantinės krano riedmenų mechanizmo santykinis ratų slydimas gali būti užrašomas lygtimis:

$$\sum X_i = \frac{V_{sx_i}}{R_i \omega_i}, \quad (2.9)$$

$$\sum Y_i = \frac{V_{sy_i}}{R_i \omega_i}, \quad (2.10)$$

$$R_i = R_{i0} + \Delta R_i (\phi_i), \quad (2.11)$$

čia R_{i0} – krano rato spindulys, ΔR_i – krano rato spindulio nuokrypis, kuris atsiranda po ilgo naudojimosi laiko sudėtingomis sąlygomis. Dauguma ratų nuokrypių atsiranda stabdymo metu. Dažniausiai tokio pobūdžio rato nuokrypiai būna labai maži, tačiau senuose kranuose ratų nusidėvėjimas gali pasiekti kritines ribas, kas gali sukelti pavojingas vibracijas, kurios daro įtaką visai krano sistemai.



2.10 pav. Krantinės krano rato deformacijos
Fig. 2.10. The quay crane wheel deformations

Kiekvienas krano ratų rinkinys turi atskirus variklius (E) ir transmisijas (T), todėl skiriasi ir variklių galios, ir ratų nusidėvimas yra nevienodas (atsirandantis dėl įvairiausių priežasčių). Konteinerio transportavimo procese jėga, tenkanti kiekvienai ratų sistemai, turi būti skaičiuojama atskirai, tačiau tolimesniuose skaičiavimuose bendru atveju priimsime, kad kiekvienam ratui tenka tokia pati jėga:

$$F_{T_i} = K \sum X_i \text{sign}(-V_{sx_i}), \quad (2.12)$$

$$F_{S_i} = K \sum Y_i \text{sign}(-V_{sy_i}). \quad (2.13)$$

Kontakto vietoje tarp krantinės krano ratų ir bėgio X ir Y ašimis atsirandanti jėga užrašoma taip:

$$F_{x_i} = F_{T_i} \cos \phi_{ZC1} - F_{S_i} \sin \phi_{ZC1}, \quad (2.14)$$

$$F_{y_i} = F_{T_i} \sin \phi_{ZC1} + F_{S_i} \cos \phi_{ZC1}. \quad (2.15)$$

Krano ratuose variklio jėgos lygtyse elastiniam slydimui randamas koeficientas K kuris yra nusakomas per F , remiantis Kotlerio 27-ąja lygtimi. Šioje lygtyje spaudimo jėga F_{Z_i} tarp i -tojo rato ir bėgių nustatoma pagal Herco teorija:

$$F_{Z_i} = K_{T_i} \delta_{Z_i}^n, \quad (2.16)$$

$$\delta_{Z_i}^n = \left(\{R_{cb_i}\} + h_{b_i} \{e_3\} \right) - \left(\{R_{O_i}\} - R_i(\phi_i) \{e_3\} \right) > 0, \quad (2.17)$$

čia $\{R_{cb_i}\}$ – krano ratų geometrinis centras (cb_i) apibendrintoje koordinačių sistemoje X, Y, Z , $\{e_3\}$ – vienetinis vektorius, $\{e_3\} = [0, 0, 1]$. h_{b_i} – atstumas tarp bėgių ir krano ratų geometrinio centro, n – laipsnio rodiklis ($n = 3/2$ (Herco teorija)). atstumas h_{b_i} tarp bėgio ir krano:

$$h_{b_i} = \{X_{b_i}\} = h_{b_i} + \Delta h_{b_i}(X_{b_i}). \quad (2.18)$$

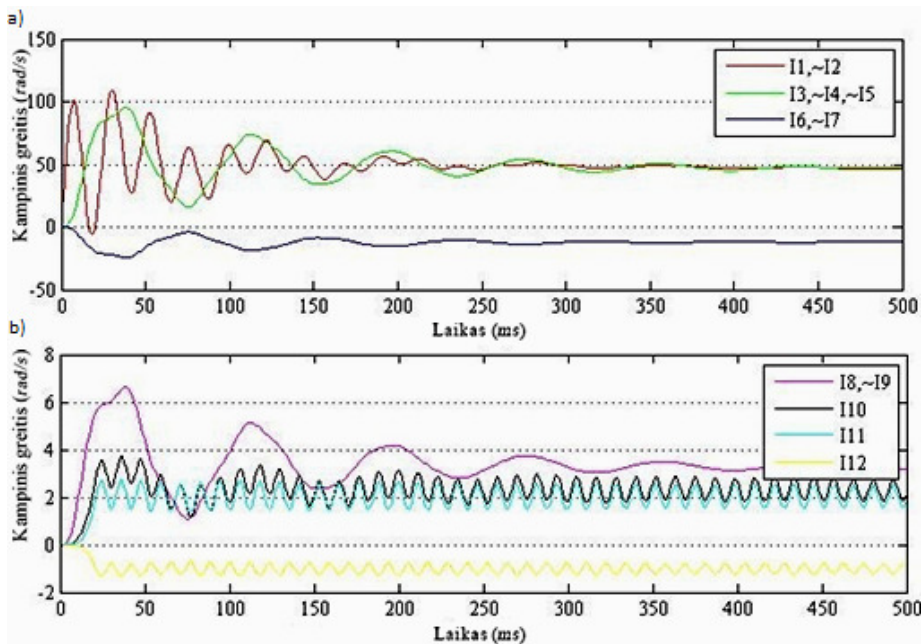
Vektorius $\{R_{O_i}\}$, yra skaičiuojamas:

$$\{R_{O_i}\} = \{R_{C_1}\} + [A_1(\phi_{ZC1})]\{r_{C_1,O_i}\}, \quad (2.19)$$

čia $\{r_{C_1,O_i}\}$ vektorius, kuris eina nuo krantinės krano masės centro iki rato centro, jis įtrauktas todėl, kad būtų galima apskaičiuoti veiksnių įtaką kiekvienam faktoriui.

2.2.2. Kompiuterinės imitacijos rezultatų aptarimas

Atlikus krantinės krano ratų įtakos transportavimo procesui modeliavimą, buvo suskaičiuoti ir pagrindinių riedmenų sistemos kampiniai greičiai. Taip pat įvertintos ir jų optimizavimo galimybės. Gauti matematinio modeliavimo rezultatai pateikiami 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Krano pagrindinių riedmenų sistemos modeliavimo rezultatai: a) I1– I7 elementų kampinis greitis; b) I8– I12 elementų kampinis greitis

Fig. 2.11. The results of modelling of quay crane main wheels system: a) I1– I7 component angular velocity; b) I8– I12 component angular velocity

Gauti rezultatai rodo, kad kiekvienas riedmenų sistemos mechanizmo kampinis greitis stabilizuojasi greičiau nei per 300 ms. Taip pat nustatyta, kad didžiausios krano vibracijos atsiranda krano startavimo metu. Šios imitacijos metu gauti rezultatai panaudoti išmanaus krano algoritmų kūrimo. Taip pat atsižvelgiama į startavimo metu kylančias vibracijas ir jų įtaką transportuojamam konteineriui.

2.3. Krano kėlimo mechanizmo matematinis modeliavimas ir pereinamųjų procesų analizė

Didinti krovinio saugumą transportavimo metu, krantinės krano dinaminį procesų modeliavimas, yra viena iš aktualių ir aktyvių šių dienų tyrimo sričių. Pagrindinis tokių tyrimų tikslas – nustatyti veiksnių įtaką transportavimo procesui, esant skirtingoms aplinkos sąlygoms ir taikant skirtingas valdymo technikas (Bogdevicius & Vika, 2005; Ismail *et al.*, 2009; Jaafar, Mohamed, Jamian, *et al.*, 2013). Mokslininkas Ismail ir kiti pristatė 3D krantinės krano dinaminį modelį skirtą judėjimo sistemos analizavimui (Ismail *et al.*, 2009). Skaičiavimams jie naudojo Lagrandžo metodą. Mokslininkai, naudodami sukurtą modelį, rinko ir analizavo vežimėlio pozicijos įtaką kėlimo mechanizmo pasvirimo kampui, matuojant pasvirimo kampo atsako laiką vežimėlio judėjimo metu. Gauti rezultatai gali būti pritaikomi efektyvių krantinės krano valdymo algoritmų kūrimui, dviejų griebtuvų sistemose. Kitame darbe (Jaafar, Mohamed, Jamian, *et al.*, 2013) mokslininkai sukūrė netiesinės krantinės krano sistemos modelį, kuriame vertino įvairių veiksnių įtaką krovos procesui. Darbe buvo atsižvelgiama į jėgimo įtampą, kabelių ilgį, apkrovos ir vežimėlio masę. Imitacijos metu gauti tyrimo rezultatai parodė, kad krantinės krano sistema yra ypatingai jautri bet kokiems, net ir minimaliems, parametų pokyčiams. Taip pat nustatyta, kad bloga parametų kombinacija gali būti viena iš pagrindinių priežasčių, darančių įtaką konteinerio svyravimams ir krovos procedūrų saugumo problemoms. Šių tyrimų rezultatai taip pat yra labai aktualūs kranų autonominio valdymo algoritmų kūrimui. Atsižvelgiant į 2.1 poskyrio rezultatus taip pat galima teigti, kad pereinamieji procesai bei galimos riedmenų deformacijos taip pat turi įtakos atsirandantiems svyravimams krovinio transportavimo metu. Nors startavimo metu pereinamieji procesai trunka vos ~300 ms, tai gali sukelti išliekamuosius svyravimus, kurie apsunkina išmaniųjų konteinerių koncepcijos integraciją į uosto infrastruktūrą bei autonominio krantinės krano koncepcijos įgyvendinimą, kuriant sumaniuosius valdymo algoritmus.

Daugelio mokslininkų analizuojamos problemos, siejamos su krantinės kranų dinamika, valdymu ir saugumo problemomis, yra pateikiamos tik iš vienos pusės, nevertinant kitų, galimai krovos procedūroms įtaką darančių veiksnių. Pavyzdžiui, mokslininkų aprašytame darbe pateikiama krantinės krano valdymo sistema

su būsenos imitatoriumi (Tomczyk *et al.*, 2014). Mokslininkų aprašytas dinaminis modelis skirtas spręsti kranų valdymo problemas esant skirtingiems vėjo sukeliams trukdžiams. Didelių gabaritų krovinių judesių imitavimui, kai krovoje naudojami plūduriuojantys kranai, sukurtas dinaminis kranų modelis, skirtas transportavimo problemų sprendimui ieškoti (Cha *et al.*, 2010). Dauguma tokių darbų ir juose pateiktų modelių yra skirti specifinėms krovos problemoms, todėl jų pakartotinis panaudojimas mūsų tyrimuose yra negalimas.

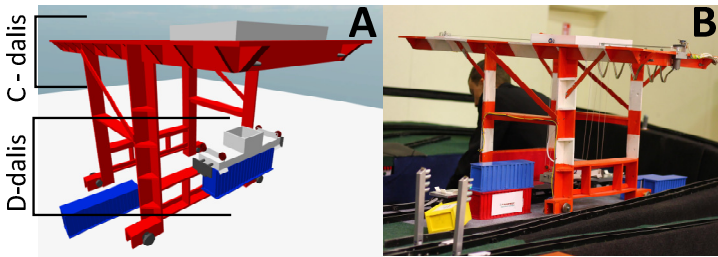
Šiame darbe pateikiamas sukurtas krantinės kranų konteinerių griebtuvo ir kėlimo mechanizmo dinaminis modelis, kurio pagrindas yra daugiakūnė sistema. Šis modelis gali būti pritaikomas kaip įrankis spręsti įvairialypes problemas. Jis nesudėtingai gali būti naudojamas analizuoti vėjo įtaką krovos procesui, transportavimo trajektorijos planavimui ar prognozuojančios valdymo sistemos kūrimui ir imitavimui.

Kitame poskyryje pateikiamas krantinės kranų dinaminis modelis, skirtas griebtuvo ir kėlimo mechanizmo dinaminį procesų analizavimui. Šis modelis buvo kuriamas atsižvelgiant į laboratorinio kranų parametrus, tokius kaip prototipo matmenys, variklių galimybės, kėlimo galia ir pan. Taip pat pateikiamos judėjimo lygtys bei apibrėžti pradiniai duomenys naudojami imitacijoje. Pateikiami bei aptariami imitacijos metu gauti rezultatai.

2.3.1. Kranų kėlimo mechanizmo matematinis modeliavimas

Remiantis pirmojo skyriaus išvalgiomis, prieš kuriant sumanuosius valdymo algoritmus išmanių konteinerių integracijai ir autonominės krovos realizavimui, visų pirma buvo sukurtas krantinės kranų kėlimo mechanizmo matematinis modelis bei laboratorinis mažo mastelio prototipas (2.12 paveikslas). Atliekant eksperimentus ir vertinant matavimų rezultatus, analizuojama pereinamųjų procesų įtaką krovos procesui ir vertinamas skaičiavimų patikimumas, palyginant suskaičiuotas ir išmatuotas reikšmes. Taip pat vertinsime atsirandančias vibracijas bei jų sukėlimo priežastis. 2.14 Paveiksle pažymėta „C-dalis“ dalis – vežimėlis su kėlimo mechanizmu, „D-dalis“ – konteinerinis griebtuvas. Krantinės kranų vežimėlis ir griebtuvas yra sumodeliuoti taip, kaip pavaizduota 2.12 paveiksle. Vežimėlis ir kėlimo mechanizmas yra paskirstyta sistema, kurios masė m_1 yra koncentruota centre, kaip ir griebtuvo masė m_2 .

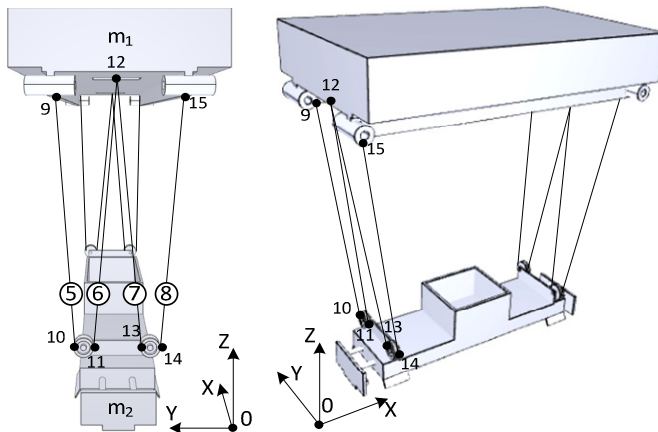
Krantinės kranas yra kabeliais sujungta sistema, kurioje, naudojant keturis jungiamuosius kabelius nuo kėlimo mechanizmo iki griebtuvo yra kilnojamas krovinių aukštyn ar nuleidžiamas žemyn (Ziyad N. Masoud, 2009).



2.12 pav. Laboratorinis krantinės krano modelis (A – virtualus, B – fizinis)

Fig. 2.12. Laboratory scaled quay crane model (A – virtual, B – physical)

Sukurtame modelyje yra atsižvelgiama į kabelių elastingumą ir elektrinių variklių pereinamuosius procesus. Transportavimo sistemoje naudojamas vienas asinchroninis variklis su skriemuliu ir kreipiantieji skriemuliai, kurie integruoti į krano konstrukciją. Kėlimo mechanizmo sistema yra sumontuota vežimėlio viršuje. Kėlimo procedūra valdoma keturiais varikliais su skriemuliais, o griebtuvas laikomas keturių sukamųjų skriemulių.

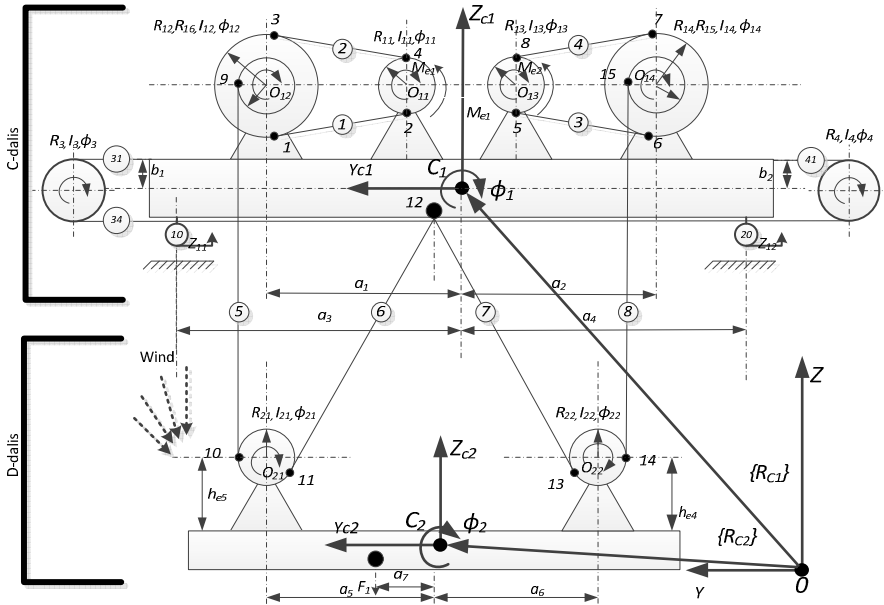


2.13 pav. Krano griebtuvo ir kėlimo mechanizmo 3D modelis

Fig. 2.13. 3D model of quay crane spreader and lifting mechanism

Krantinės krano matematinis modelis buvo sukurtas ir anksčiau, mokslininko Masoud *et al.* (Z. N. Masoud, 2005), kuriame yra vertinama kietų kūnų dinamika esant apkrovai transportavimo metu. Pristatytas dinaminis modelis, kaip ir disertacijoje aprašytas, yra krano kėlimo mechanizmas su lynų sistema, kurioje konteineris yra laikomas griebtuvo. Šis sujungtas su kėlimo mechanizmu keturiais lynais. Disertacijoje pateiktas krantinės krano modelis yra išskirtinis tuo, kad jis

pritaikytas kompleksinėms užduotims, o tai priartina jį prie šių dienų kranų sistemų. Kaip pavaizduota 2.13 paveiksle lynai 6 ir 7 susieti per sukamąjį skriemulį, kuriame lyno sąlyčio taškai pažymėti 10 ir 11. Taip pat su lynais 7 ir 8. Šeštas ir septintas kabeliai yra pritvirtinti 12 taške. Mes taip pat laikome, kad vežimėlis ir griebtuvas, kurių masių centrai – m_1 ir m_2 , yra kietieji kūnai, sujungti lynais. Šio trimačio standartinio krantinės krano modelio dinaminės charakteristikos pateikiamos paveiksle (2.14 paveikslas).



2.14 pav. Kranų griebtuvo ir kėlimo mechanizmo dinaminis modelis
 Fig. 2.14. Dynamics model of quay crane spreader and lifting mechanism

Atsižvelgiant į paveikslą, ir dinaminę sistemą, vežimėlis juda išilgai Y ašimi, perduodamas kitoms dalims judesį ir vibracijas. Vežimėlio ratas (R_i) yra vežimėlio sistemos dalis sujungta su vežimėlio varikliu per jėgos perdavimo lynus (31, 34, 41). Apskritimuose skaičiai reiškia, kad sistema turi standumo ir slopinimo koeficientus kabeliuose. Griebtuvas yra pakabintas ant lynų 5,6,7,8 ir juda kartu su vežimėliu. Įvertinus realias kranų darbo sąlygas, modelyje taip pat įtrauktas krovinio sukamasis judesys, kad ateityje būtų galima vertinti atsirandančius didelius svyravimų kampus, kaip tai padarė ir mokslininkas Lee (H.-H. Lee, 2004).

Sukurtas krantinės kranų griebtuvo ir kėlimo mechanizmo modelis yra paremtas keliais pagrindiniais aspektais. Visų pirma priimta, kad visi kūnai modelyje yra kietieji kūnai, kurie negali deformuotis. Taip pat yra perteikti fiziniai ir

matematiniai kabelių parametrai, bei kabelio deformacija keliant sunkius krovinis, kurie aprašyti lygtimis. Taip pat vertinami elektrinių variklių pereinamieji procesai bei vežimėlio kelio nelygumai.

Sprendžiant konteinerio transportavimo problemas, darbe pateiktas matematinis krantinės krano kėlimo mechanizmo ir griebtuvo modelis, kuris leis nustatyti veiksnius darančius įtaką transportavimo procedūroms. Žemiau pateikiama pirmojo asinchroninio variklio M_{ei} su reduktoriumi sukimo momento lygtis:

$$\dot{M}_{ei} = U_{redei} C_{ei} (\omega_{ei0} - U_{redei} \dot{\phi}_i) - d_{ei} M_{ei}, \quad (2.20)$$

čia d_{ei} ir C_{ei} – variklio parametrai (Bogdevičius, 2012), ω_{ei0} – variklio kampinis greitis, U_{redei} reduktoriaus perdavimo skaičius ir $dM_{ei} / dt \equiv \dot{M}_{ei}$. Analizuojama sistema turi du kūnus, kurių masių centrai yra taškuose C_i ir C_j . Šie kūnai (pirmas kūnas – vežimėlis, antras kūnas – griebtuvas) yra sujungti lynu tvirtinimo taškuose i ir j , kaip ir panašiuose kitų autorių darbuose (Yoshihara *et al.*, 2003; Tanaka *et al.*, 2008). Pagrindiniai lyno parametrai tai standumo k_{ij} ir slopinimo c_{ij} koeficientai. Tempimo jėga šiuose kabeliuose yra F_{ij} . Tempimo jėgos mechaninio darbo variacija šiuose kabeliuose yra:

$$\delta W_{ij} = \frac{F_{ij}}{L_{ij}} \delta L_{ij}, \quad (2.21)$$

čia L_{ij} lyno ilgis tarp taškų i ir j , yra ilgio variacija ir $\dot{L}_{ij} \equiv dL_{ij} / dt$ yra pirmoji L_{ij} laiko išvestinė. Jėga F_{ij} yra lygi:

$$F_{ij} = -k_{ij} (L_{ij} - L_{ij0}) - c_{ij} \dot{L}_{ij}, \quad (2.22)$$

ilgis tarp taškų i ir j yra lygus:

$$L_{ij} = \sqrt{\{R_{ij}\}^T \{R_{ij}\} - R_{2k} \phi_{2k}}, \quad (2.23)$$

čia $\{R_{ij}\}$ yra i ir j vektoriai, bendroje koordinačių sistemoje OXYZ:

$$\{R_i\} = \{R_{ci}\} + [A(\phi_i)] \{r_{ci,i}\} = \{R_{c0i}\} + \{q_{ci}\} + [A(\phi_i)] \{r_{ci,i}\}, \quad (2.24)$$

$$\{R_j\} = \{R_{cj}\} + [A(\phi_j)] \{r_{cj,j}\} = \{R_{c0j}\} + \{q_{cj}\} + [A(\phi_j)] \{r_{cj,j}\}, \quad (2.25)$$

čia $\{R_{c0i}\}$ ir $\{R_{c0j}\}$ yra kūnų masių centro pradiniai vektoriai, $\{q_{ci}(t)\}$ ir $\{q_{cj}(t)\}$ – kūnų masių centro poslinkio vektoriai, $\{q_{ci}\}^T = [q_{ciy} \ q_{ciz}]$, $\{q_{cj}\}^T = [q_{c jy} \ q_{c jz}] \cdot [A(\phi_i)]$ ir $[A(\phi_j)]$ yra pasisukimo matricos:

$$\left[A(\phi_i) \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_i) & -\sin(\phi_i) \\ 0 & \sin(\phi_i) & \cos(\phi_i) \end{bmatrix}, \left[A(\phi_j) \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_j) & -\sin(\phi_j) \\ 0 & \sin(\phi_j) & \cos(\phi_j) \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

Taip pat $\{r_{ci,i}\}$ yra vektorius tarp masių centro C_i ir kūno taško i , kaip ir $\{r_{cj,j}\}$ yra vektorius tarp masių centro C_j ir kūno taško j . Ilgio variacija L_{ij} yra lygi:

$$\delta L_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} \delta \{R_{ij}\}^T \{R_{ij}\} - R_{2k} \delta \phi_{2k}, \quad (2.27)$$

čia $\{R_{ij}\} = \{R_i\} - \{R_j\}$ ir $\delta \{R_{ij}\}$ gali būti užrašoma:

$$\delta \{R_{ij}\} = \left(\delta \{q_{ci}\} + \delta \phi_i \left[\frac{dA(\phi_i)}{d\phi_i} \right], \{r_{ci,i}\} - \delta \{q_{cj}\} + \delta \phi_j \left[\frac{dA(\phi_j)}{d\phi_j} \right] \{r_{cj,j}\} \right). \quad (2.28)$$

Apibendrintasis jėgos vektorius ir sukimo momentas veikiantis tarp taškų i ir j bei skriemulio sukimo momento yra lygus:

$$\{Q_{Ri}\} = \frac{F_{ij}}{L_{ij}} \{R_{ij}\}, \quad Q_{\phi_i} = \frac{F_{ij}}{L_{ij}} \left(\left[\frac{dA(\phi_i)}{d\phi_i} \right] \{r_{ci,i}\} \right)^T \{R_{ij}\}, \quad (2.29)$$

$$\{Q_{Rj}\} = -\frac{F_{ij}}{L_{ij}} \{R_{ij}\}, \quad Q_{\phi_j} = -\frac{F_{ij}}{L_{ij}} \left(\left[\frac{dA(\phi_j)}{d\phi_j} \right] \{r_{cj,j}\} \right)^T \{R_{ij}\}, \quad (2.30)$$

$$Q_{2k} = -\frac{F_{ij}}{L_{ij}} R_{2k}. \quad (2.31)$$

Trečiojo ir ketvirtojo asinchroninio variklio sukimo momentas (vežimėlio judėjimo lygtys) gali būti užrašomas:

$$\dot{M}_{e3} = U_{red3} C_{e3} (\omega_{e30} - U_{red3} \dot{\phi}_3) - d_{e3} M_{e3}, \quad (2.32)$$

$$I_3 \ddot{\phi}_3 = -k_{31} R_3 (R_3 \phi_3 + q_{c1y} - b_1 \phi_1) - c_{31} R_3 (R_3 \dot{\phi}_3 + \dot{q}_{c1y} - b_1 \dot{\phi}_1) - k_{34} R_3 (R_3 \phi_3 - R_4 \phi_4) - c_{34} R_3 (R_3 \dot{\phi}_3 - R_4 \dot{\phi}_4) + M_{e3} - M_{e3R}, \quad (2.33)$$

$$I_4 \ddot{\phi}_4 = -k_{41} R_4 (R_4 \phi_4 + q_{c1y} - b_2 \phi_1) - c_{31} R_3 (R_4 \dot{\phi}_4 + \dot{q}_{c1y} - b_2 \dot{\phi}_1) - k_{34} R_4 (R_4 \phi_4 - R_3 \phi_3) - c_{34} R_4 (R_4 \dot{\phi}_4 - R_3 \dot{\phi}_3) - M_{e4R}, \quad (2.34)$$

čia $k_{31}, k_{34}, c_{31}, c_{34}$ – pavaros diržo standumo ir slopinimo koeficientai, $\phi_3, \phi_4, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4$ – yra trečiojo ir ketvirtojo variklio kampinė pozicija ir greitis, R_3, R_4 – skriemulių spinduliai, I_3, I_4 – trečiojo ir ketvirtojo variklių su skriemuliais masių inercijos momentas. M_{e3} – trečiojo variklio sukimo momentas, C_{e3}, d_{e3} – variklio parametrai, M_{e3R} – trečiojo variklio apkrovos sukimo momentas, ω_{e30} – variklio kampinis greitis.

Pirmojo kūno (vežimėlio) lygčių sistema yra:

$$[M_{c1}]\{\ddot{q}_{c1}\} = \{Q_{c1,31}\} + \{Q_{c1,41}\} + \{Q_{c1,5}\} + \{Q_{c1,6}\} + \{Q_{c1,7}\} + \{Q_{c1,8}\} + \{Q_{c1,10}\} + \{Q_{c1,20}\} + \{Q_{c1,W}\}, \quad (2.35)$$

$$I_{C1XX}\ddot{\phi}_1 = Q_{\phi1,31} + Q_{\phi1,34} + Q_{\phi1,5} + Q_{\phi1,6} + Q_{\phi1,7} + Q_{\phi1,8} + Q_{\phi1,10} + Q_{\phi1,20}, \quad (2.36)$$

čia $[M_{c1}]$ pirmojo kūno masių matrica, M_{c1} yra matrica, kurios diagonalė m_1 . $\{Q_{c1j}\}$ – yra apkrovos vektorius ($\{Q_{c1j}\}$ jėgos vektoriai pateikti priede (A priedas)). I_{C1XX} – yra masių inercijos momentas apie X_{c1} ašį. $Q_{\phi1,j}$ – yra sukimo momentas ($Q_{\phi1,j}$ sukimo momentai pateikti priede (A priedas)).

Antrojo kūno (griebtuvo) lygčių sistema yra:

$$[M_{c2}]\{\ddot{q}_{c2}\} = \{Q_{c2,5}\} + \{Q_{c2,6}\} + \{Q_{c2,7}\} + \{Q_{c2,7}\} + \{Q_{c2,8}\} + \{Q_{c2,aero}\} + \{Q_{c2,F1}\} + \{Q_{c2,W}\}, \quad (2.37)$$

$$I_{C2XX}\ddot{\phi}_2 = Q_{\phi2,5} + Q_{\phi2,6} + Q_{\phi2,7} + Q_{\phi2,6} + Q_{\phi2,8} + Q_{\phi2,6} + Q_{\phi2,aero} + Q_{\phi2,F1}, \quad (2.38)$$

čia, $[M_{c2}]$ antrojo kūno masių matrica, M_{c2} yra matrica, kurios diagonalė m_2 . $\{Q_{c2j}\}$ – yra apkrovos vektorius ($\{Q_{c2j}\}$ jėgos vektoriai pateikti priede (A priedas)). I_{C2XX} yra masių inercijos momentas apie X_{c2} ašį. $Q_{\phi2,j}$ – yra sukimo momentas ($Q_{\phi2,j}$ sukimo momentai pateikti priede (A priedas)).

Griebtuvo kairės pusės skriemulio sukimosi lygtis:

$$I_{21}\ddot{\phi}_{21} = R_{21}(F_5 - F_6) - M_{21,R}(\dot{\phi}_{21}), \quad (2.39)$$

čia F_5 ir F_6 yra jėgos veikiančios penktame ir šeštame lyne (F_5, F_6 yra jėgų vektoriai, kurie pateikti priede (A priedas). $M_{21,R}(\dot{\phi}_{21})$ trinties jėgos sukimo momentas. Griebtuvo dešinės pusės skriemulio sukimosi lygtis:

$$I_{22}\ddot{\phi}_{22} = R_{22}(F_7 - F_8) - M_{22,R}(\dot{\phi}_{22}), \quad (2.40)$$

čia F_7 ir F_8 yra jėgos veikiančios septintame ir aštuntame lyne (F_7, F_8 yra jėgų vektoriai, kurie pateikti priede (A priedas); $M_{22,R}(\dot{\phi}_{22})$ – trinties jėgos sukimo momentas. Apibendrinta sistemos judėjimo lygtis pateikiama bendru pavidalu kaip ir daugumoje kitų autorių sudarytuose modeliuose (Maneeratanaporn & Murakami, 2012; Nundrakwang *et al.*, 2008; Pan *et al.*, 2011):

$$\{\dot{Y}\} = \{B(Y,t)\}, \quad (2.41)$$

čia:

$$\{Y\}^T = \begin{bmatrix} M_{e3} \phi_3 \phi_4 \{q_{c1}\}^T \phi_1 \{q_{c2}\}^T \phi_2 \phi_{21} \\ \phi_{22} \dot{\phi}_3 \dot{\phi}_4 \{\dot{q}_{c1}\}^T \dot{\phi}_1 \{\dot{q}_{c2}\}^T \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_{21} \dot{\phi}_{22} \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

ir $\{B(Y,t)\}$ yra netiesinis sistemos vektorius,

$$\begin{aligned} \{B(Y,t)\} = \\ = \left\{ \begin{array}{cccccccccc} U_{red3} & C_{e3} & \omega_{e3} & 0 & 0 & \{0\}^T & 0 & \{0\}^T & 0 & 0 & 0 \\ B_{\phi3} & B_{\phi4} & \{B_{qc1}\}^T & B_{\phi1} & \{B_{qc2}\}^T & B_{\phi2} & B_{\phi21} & B_{\phi22} & & & \end{array} \right\}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Atsižvelgiant į 2.1.2 poskyryje aprašytus rezultatus, kurie rodo, kad pereinamieji procesai, krantinės krano pagrindinėje riedmenų sistemoje galimai turi įtakos krovos procesui, sukurtas krantinės krano kėlimo ir griebtuvo matematinis modelis, kuris tolimesniuose moksliniuose tyrimuose bus naudojamas kaip universalus įrankis veiksmų nustatymui ir algoritmų testavimui.

2.3.2. Modeliavimo rezultatai ir pereinamųjų procesų analizė

Matematinio modelio, aprašyto 2.2 poskyryje, panaudojimo galimybės su atitinkamais pakeitimais, privalomais kiekvienos situacijos adaptacijai, yra pakankamai plačios. Toliau darbe, atsižvelgiant į nagrinėjamą tematiką, sukurtas įrankis, kuris panaudotas krantinės krano kėlimo mechanizmo ir griebtuvo imitacijai, kai vyksta konteinerio transportavimo. Šie rezultatai parodys, kaip antrasis kūnas

(griebtuvas) reaguoja į pereinamuosius procesus, ir kaip tai atsiliepia išliekamiesiems svyravimams. Šiuo atveju imitacija atliekama remiantis laboratorinio (sumažinto mastelio) modelio parametrais, kurie pateikiami pirmoje lentelėje. Šiame matematiname eksperimente buvo imituojamas transportavimo procesas iš pradinio taško A į galinį tašką B. Šie taškai orientaciniai, žymintys proceso pradžią ir pabaigą.

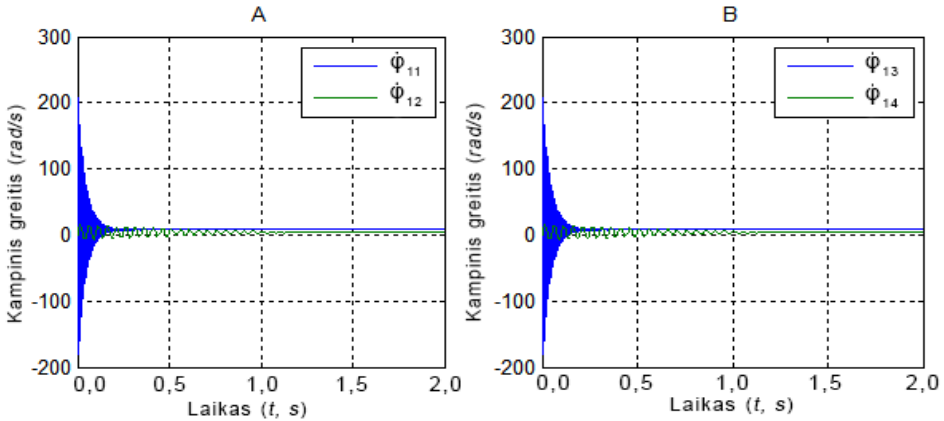
2.2 lentelė. Krantinės krano kėlimo mechanizmo sistemos parametrų vertės

Table 2.2. The values of quay crane lifting mechanism system parameters

Simbolis	Matavimo vienetai	Vertė	Simbolis	Matavimo vienetai	Vertė
a_1	m	0,1	R_{11}	m	0,02
a_2	m	0,1	R_{12}	m	0,04
a_3	m	0,2	R_{13}	m	0,02
a_4	m	0,2	R_{14}	m	0,02
a_5	m	0,1	R_{15}	m	0,04
a_6	m	0,1	R_{16}	m	0,02
I_1	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1	R_{21}	m	0,02
I_2	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1	R_{22}	m	0,02
I_{11}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_1	m	0,02
I_{12}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_2	m	0,02
I_{13}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_3	m	0,1
I_{14}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_4	m	0,1
I_3	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_5	m	0,1
I_4	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_6	m	0,1
I_{21}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	b_7	m	0,2
I_{22}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,1	m_{c1}	Kg	10
C_{ei}	Nm	379,12	m_{c2}	Kg	20
d_{e1}	1/s	46,728	U_{red1}	-	20
k_x	N/m	106	U_{red2}	-	20
c_x	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$	0,01	Δt	s	10^{-5}

Matematinėje imitacijoje neatsižvelgiama į krano valdymo algoritmus bei optimizacijas. Taip buvo pasirinkta tam, kad geriau suprasti šių procesų metu atsiradusių svyravimų priežastis, kadangi net ir menkiausias valdymas ar programinis įsikišimas į transportavimo procesą turi įtakos ant lynų kabančio griebtuvo judesių specifikai. Transportavimo procesui imituoti buvo imituojamas pirmojo ir antrojo griebtuvo kėlimo variklių darbas. Visiems atliktiems skaičiavimams buvo naudojami parametrai, pateikti 2.2 lentelėje, analogiškai pateikiami parametrai ir kitų

autorių darbuose (Maneeratanaporn & Murakami, 2012). Atsižvelgiant į pagrindinį šios imitacijos tikslą, nuspręsta, kad imitacijos trukmė bus 10 sekundžių, kuri pakanka norint įvertinti pereinamųjų procesų įtaką konteinerių krovai.

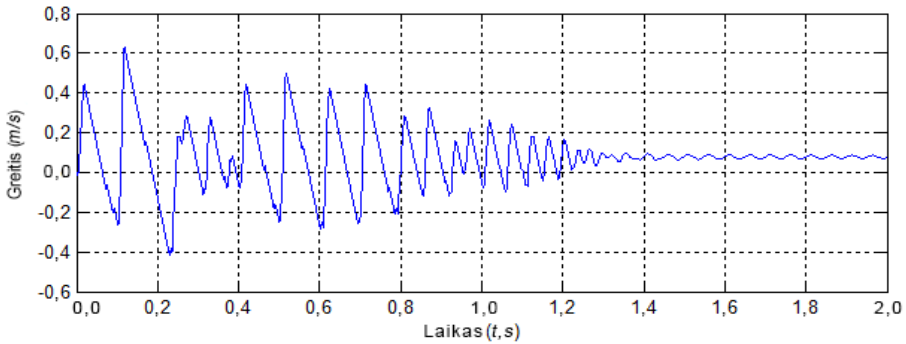


2.15 pav. Variklio su skriemuliu kampinis greitis (A – pirmojo variklio $\dot{\phi}_{11}$ su skriemuliu $\dot{\phi}_{12}$, ir B – antrojo variklio $\dot{\phi}_{13}$ su skriemuliu $\dot{\phi}_{14}$)

Fig. 2.15. Angular velocity of motor with pulley (A – first motor $\dot{\phi}_{11}$ with pulley $\dot{\phi}_{12}$, and B – second motor $\dot{\phi}_{13}$ with pulley $\dot{\phi}_{14}$)

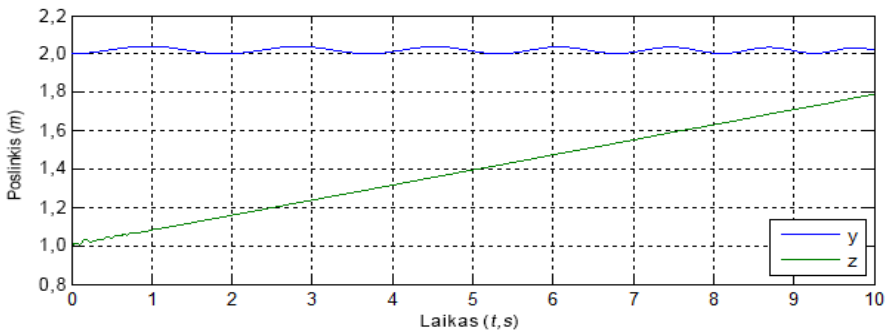
Gauti imitacijos rezultatai (2.15–2.19 paveikslai) rodo, kad pereinamųjų procesų sukelti judesiai stabilizuojasi per 2 sekundes nuo startavimo procedūros pradžios. Taigi, pateikiamuose rezultatų grafikuose bus filtruojamas ir pateikiamas šis laiko periodas.

Pateiktame 2.15 paveiksle pirmojo ir antrojo variklių su skriemuliais kampinių greičių imitacijos rezultatai, kuriuose galima matyti, kad abiejų variklių kampinio greičio amplitudė sistemos startavimo pradžioje yra didesnė. Tačiau tai yra standartinis asinchroninio variklio reiškinys, kuris, kaip matome 2.15 paveiksle, trunka 0,2 sekundės. Tačiau šie pereinamieji procesai persiduoda ir į skriemulius, kuriuose jų trukmė yra apie 1,0 sekundę. Imitacijos rezultatai parodo, kad abu varikliai dirba panašiai, todėl galima daryti prielaidą, kad matematinis modelis parengtas teisingai.



2.16 pav. Vertikalus krovinio kėlimo greitis
Fig. 2.16. Vertical velocity of cargo lifting

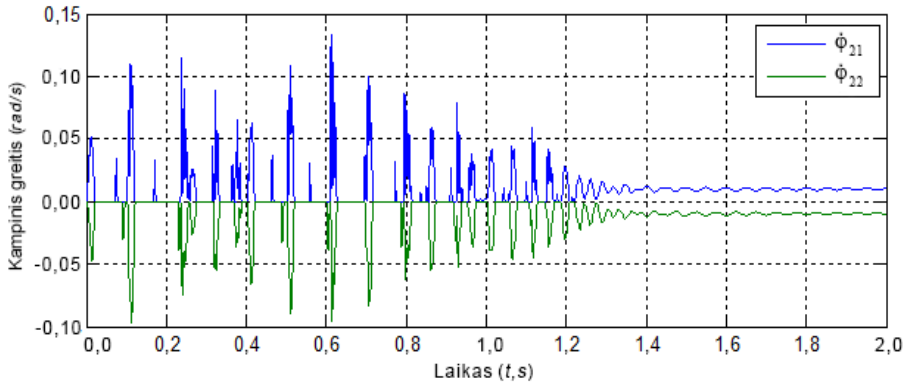
Krovinio kėlimo variklių pereinamieji procesai taip pat daro įtaką ir kėlimo greičiui. Kaip parodyta 2.16 paveiksle, didelės amplitudės vibracijos daro įtaką vertikaliajam krovinio kėlimo greičiui. Šios vibracijos trunka ilgiau, nei variklių pereinamuosiuose procesuose. Taip yra todėl, kad konteineris su griebtuvu ir pakabintas ant lynų yra veikiamas krovinio svorio. Dėl šios priežasties (2.16 paveikslas) pereinamųjų procesų sukeltos vibracijos daro įtaką kėlimo greičiui net 1,4 sekundės. Krovinio poslinkis pavaizduotas 2.17 paveiksle, kuriame pateikiami $\{R_{C2}\}$ vektoriaus komponentai, tai z ir y ašių koordinatės.



2.17 pav. Krovinio horizontalus (Y ašimi) ir vertikalus (Z ašimi) poslinkiai
Fig. 2.17. Cargo horizontal (Y axis) and vertical (Z axis) displacement

Horizontalusis poslinkis (Y ašimi) rodo kad svyravimo amplitudė yra apie 5 centimetrai, o vertikalusis poslinkis (Z ašimi) rodo krovinio pakėlimo aukštį. Gauti rezultatai rodo, kad pasiektas krovinio kėlimo greitis yra 0,08 m/s. Taip pat 2.17 paveiksle matome, kad krovinys buvo pakeltas į 0,8 metrų aukštį (nuo 1,0 m

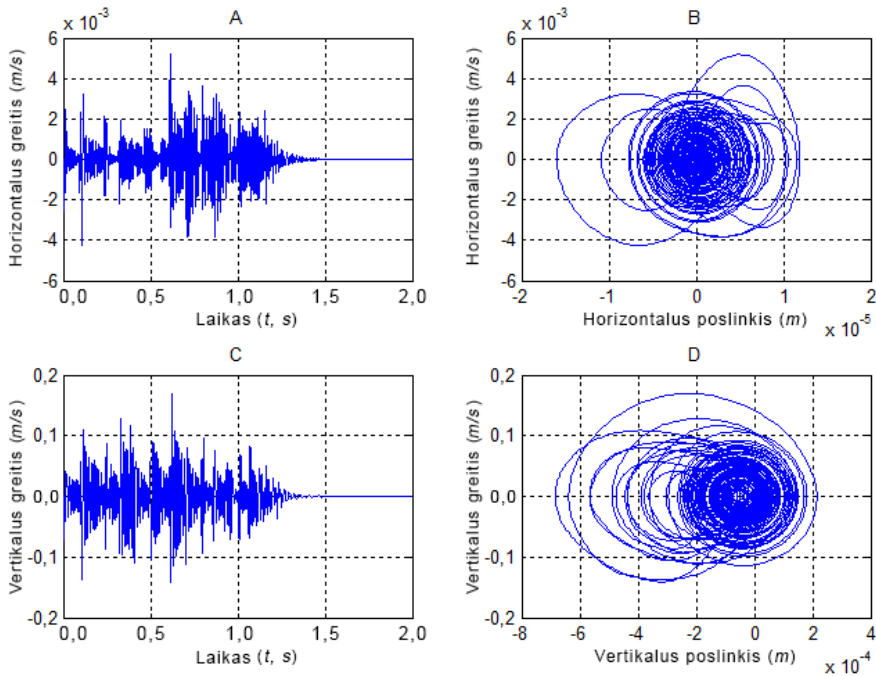
iki 1,8 m) per 10 sekundžių. Griebtuvo skriemulių kampiniai greičiai pavaizduoti 2.18 paveiksle, kuriame matosi, kad skriemuliai sukasi vienodais greičiais, tačiau priešinga kryptimi. Dešinysis skriemulys sukasi laikrodžio rodyklės kryptimi, o kairysis – prieš laikrodžio rodyklę.



2.18 pav. Griebtuvo kairiojo ir dešiniojo skriemulių kampiniai greičiai
Fig. 2.18. Angular velocities of spreader left and right pulleys

Kėlimo procedūros metu abu skriemuliai sukasi nedideliu kampiniu greičiu. Šiems skriemuliams taip pat persiduoda pereinamųjų procesų metu sukeltos vibracijos, kurios trunka apie 1,4 sekundės. Kaip pateikta 2.18 paveiksle, galima matyti, kad griebtuvo skriemuliuose kampinis greitis pereinamųjų procesu metu siekia 0,01 rad/s. Lyginant su kitais skriemuliais, šie papildomai yra veikiami trinties jėgos polispastuose. Tai taip pat daro įtaką ir pereinamųjų procesų sukeltiems išliekamiesiems svyravimams, kurie matomi 2.16 paveiksle, kai krovinys yra transportuojamas.

Atliekant konteinerio transportavimo procedūrų imitaciją, pastebėta, kad pereinamieji procesai daro įtaką visai kranų sistemai. Tai galima pamatyti šios imitacijos metu gautuose rezultatuose (2.19 paveikslas). Pereinamųjų procesų sukeltos vibracijos persiduoda vežimėliui visomis kryptimis. 2.19 paveiksle, A ir C dalyje vaizduojamas vertikalusis ir horizontalusis vežimėlio greitis. Čia pereinamieji procesai trunka apie 1,5 sekundės, o po jų greitis artėja prie nulio. Tai reiškia, kad stabilizuojasi vežimėlio dinaminis balansas. 2.19 paveiksle B ir D dalyje vaizduojamos grįžtamojo slenkamojo judesio horizontalaus ir vertikalaus poslinkio fazių diagramos. Šiose fazių diagramose akivaizdžiai matomas maksimalus vežimėlio poslinkis, bei minimalus ir maksimalus greitis. Taip pat matosi, kad vežimėlio dinaminis balansas stabilizuojasi ir poslinkis artėja į nulį. Taip atsitinka todėl, kad krovinys yra keliamas pastoviu greičiu.



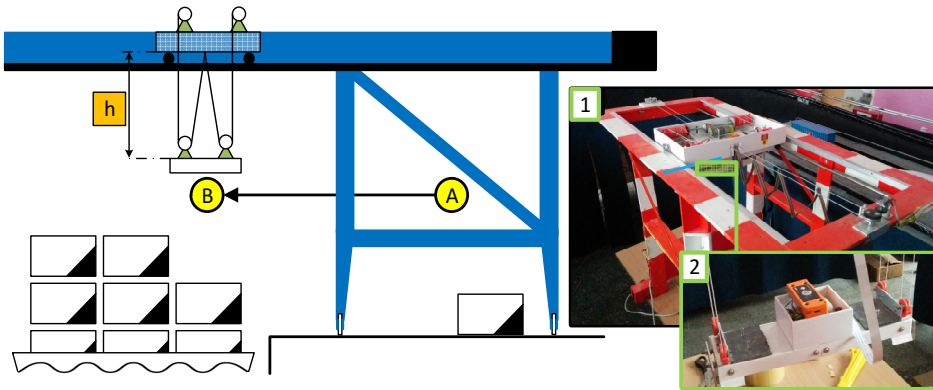
2.19 pav. Vežimėlio virpesiai (A – horizontalus greitis, B – grįžtamojo slenkamojo judesio horizontalaus poslinkio fazių diagrama, C – vertikalus greitis, D – grįžtamojo slenkamojo judesio vertikalaus poslinkio fazių diagrama)

Fig. 2.19. Trolley vibrations (A – horizontal velocity, B – the phase diagram of reciprocating horizontal displacement, C – vertical velocity, D – the phase diagram of reciprocating vertical displacement)

Atlikta daugiakūnė krantinės krano ir griebtuvo dinaminė imitacija parodo, kad pereinamųjų procesų metu sukelti virpesiai daro įtaką visai sistemai. Asinchroninių variklių pereinamųjų procesų sukeltos vibracijos atsiranda sistemos paleidimo metu, startavimo procedūroje (Sarac & Cvetkovski, 2013; Slater, Sc, Wood, Ph, & Eng, 1967). Atsižvelgiant į kitų mokslininkų gautus rezultatus, galima daryti prielaidą, kad sukurtas dinaminis modelis ir jo imitacijos rezultatai, gali būti taikomi tolimesniuose tyrimuose, siekiant užtikrinti krantinės krano autonomiškumą.

2.3.3. Modelio verifikavimas ir rezultatų eksperimentinė patikra

Norit galutinai įvertinti gautų rezultatų patikimumą, būtina atlikti dinaminio modelio ir matematinės imitacijos patikrą, todėl šis modelis sutapatintas su laboratorinio krantinės krano modeliu, kuriame atlikti praktiniai eksperimentai. Laboratorinio krantinės krano prototipo valdymo sistema buvo suprojektuota naudojant C kalbą bei Arduino mikrovaldiklio modeliavimo plokštę. Taip pat papildomi elektronikos komponentai panaudoti krano variklių valdymui ir stovėjimo sistemos sukūrimui. Svyravimo duomenų registravimui buvo panaudotas specializuotas mažų matmenų duomenų registratorius, kuriuo matuosime griebtuvo pagreičius (pavaizduota 2.20 paveikslo antroje dalyje). Šio duomenų registratoriaus techniniai duomenys pateikti 2.3 lentelėje, o jo tvirtinimo vieta krane kartu su eksperimento koncepcinė schema pateikti 2.20 paveiksle.



2.20 pav. Laboratorinis krantinės krano prototipas ir eksperimento koncepcinė schema (1 – mažo mastelio prototipas, 2 – jutikliai ir duomenų kaupimo sistema, pritvirtinta prie griebtuvo viršutinės dalies)

Fig. 2.20. Laboratory scaled prototype of quay crane and experiment concept (1 – scaled prototype, 2 – sensors and data acquisition system, mounted on top of spreader)

Vežimėlio judėjimo imitacija atlikta krano vežimėliui važiuoja pastoviu greičiu nuo pradžios taško A iki pabaigos taško B (2.20 paveikslas). Važiavimo metu taip pat registruojami duomenys ir laboratoriniame prototipe. Krantinės krano griebtuvas pradinėje pozicijoje, prieš pradėdamatavimus, yra nuleistas nuo vežimėlio viršaus 32 centimetrus ($h = 0,32$ m). Pagrindiniai šio eksperimento metu naudojami krantinės krano parametrai pavaizduoti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Pagrindiniai skaitmeninių duomenų registravimo įrenginio parametrai.

Table 2.3. Technical specification of digital data acquisition stick

Parametrai, Hz	Reikšmės
Įrašymo dažnis, Hz	10–10000
Amplitudės atsakas ($\pm 5\%$ tikslumas (X, Y & Z ašimis)), Hz	2–1500
Skersinis jautrumas, %	<15
Natūralus įterptinis dažnis, Hz	>10000
Integruoto akcelerometro dažnis, Hz	>6000
Skaitmeninio signalo (pagreitis) triukšmas, g	$\pm 0,04$
Skaitmeninio signalo (pagreitis) tikslumas, g	0,003

Pagrindinis šio skyriaus ir eksperimento tikslas pateikti – matematinį krantinės krano kėlimo mechanizmo ir griebtuvo modelį, kiek galima labiau priartintą prie laboratorinio mažo mastelio prototipo, tam kad būtų galima jį verifikuoti atliekant praktinius eksperimentinius matavimus.

2.4 lentelė. Pagrindinės matematinio modelio parametrų vertės

Table 2.4. The main values of parameters used in mathematical model

Simbolis	Aprašymas, vienetai	Vertė
a_1	Atstumas tarp centro ir vežimėlio kairiojo skriemulio centro, m	0,062
a_2	Atstumas tarp centro ir vežimėlio dešiniojo skriemulio linijos centro, m	0,062
a_3	Atstumas tarp centro ir dešinėsios kreipiančiosios centro, m	0,2
a_4	Atstumas tarp centro ir kairiosios kreipiančiosios centro, m	0,2
a_5	Atstumas tarp centro ir griebtuvo kairiojo skriemulio centro, m	0,04
a_6	Atstumas tarp centro ir vežimėlio dešinėsios griebtuvo linijos centro, m	0,04
I_3	Krano kairiojo skriemulio inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,0010
I_3	Krano kairiojo skriemulio inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,0010
I_4	Krano dešiniojo skriemulio inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,0010
I_{21}	Griebtuvo kairiojo skriemulio inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,0010

2.4 lentelės pabaiga

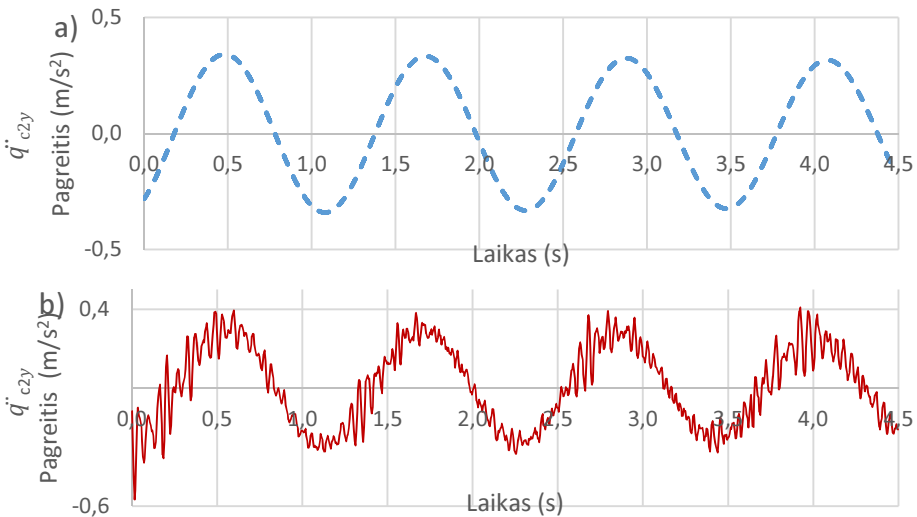
Simbolis	Aprašymas, vienetai	Reikšmė
I_{22}	Griebtuvo dešiniojo skriemulio inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,0010
C_{ei}	Variklio sukimosi momento kitimo lygtyje esantys koeficientai, Nm	379,12
d_{ei}	Variklio sukimosi momento kitimo lygtyje esantys koeficientai, $1/s$	46,728
k_x	Lyno standumo koeficientas (x -lyno numeris), N/m , kada $L5 = 0,050 m / L5 = 0,32 m$	26507/41 41
c_x	Lyno slopinimo koeficientas (x -lyno numeris), $(N*s)/m$, kada $L5 = 0,050 m / L5 = 0,32 m$	265,07/ 1,414
R_3	Krano kairiojo skriemulio spindulys, m	0,020
R_4	Krano dešiniojo skriemulio spindulys, m	0,020
R_{21}	Griebtuvo kairiojo skriemulio spindulys, m	0,015
R_{22}	Griebtuvo dešiniojo skriemulio spindulys, m	0,015
b_1	Geometriniai parametrai, m	0,02
b_2	Geometriniai parametrai, m	0,02
b_3	Geometriniai parametrai, m	0,100
b_4	Geometriniai parametrai, m	0,100
M_{C1}	Vežimėlio masė, kg	1,872
M_{C2}	Griebtuvo su kroviniu masė, $kg \cdot m^2$	0,765
I_{c1xx}	Vežimėlio masės inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,05
I_{c2xx}	Griebtuvo su kroviniu masės inercijos momentas, $kg \cdot m^2$	0,05
U_{red}	Perdavimo skaičius, -	20
Δt	Integravimo laiko žingsnis, s	10^{-5}

Siekiant įvertinti matematinio modelio patikimumą ir atsižvelgiant į eksperimentinių matavimų galimybes, analizuojami tik krantinės krano griebtuvo pagreičiai. Suskaičiuotas griebtuvo horizontalusis pagreitis bus lyginamas su duomenų registratoriaus užfiksuotais eksperimentinių matavimų duomenimis. Palyginimas bus atliktas tik Y ašies judesio kryptimi, kuriame bendra koordinacių sistema yra adaptuota laboratoriniam krantinės krano modeliui (2.13 paveikslas).

Laboratorinio krantinės krano vežimėlio ir griebtuvo (2.20–2.29 lygtys) judinamo elektrinio asinchroninio variklio (2.20 lygtis) ir elementarios standartinės

vežimėlio valdymo funkcijos (2.41 lygtys) yra matematiškai imituojama naudojant MATLAB versija R2011b (7.13.0.564).

Aparatiškai laboratoriniame krantinės krane galima išmatuoti reikšmes, atitinkančias Y_{C1} , Z_{C1} , Y_{C2} , Z_{C2} , kurios pavaizduotos 2.14 paveiksle. Atsižvelgiant į krantinės krano techninius parametrus, konstrukcines medžiagas ir jų savybes tikslinga būtų lyginti tik išmatuotą krovinio horizontalųjį pagreitį Y_{C2} ašimi. Prieš tai aprašytam matavimui buvo panaudotas mažas „MIDE“ duomenų registratorius (modelis: LOG-0002-100G), pritaikytas mažų gabaritų objektų matavimų rezultatų registravimui. Praktiniame eksperimente naudojamo duomenų registratoriaus techniniai duomenys pateikti 2.3 lentelėje, kurie aprašyti įrenginio techninėje specifikacijoje.

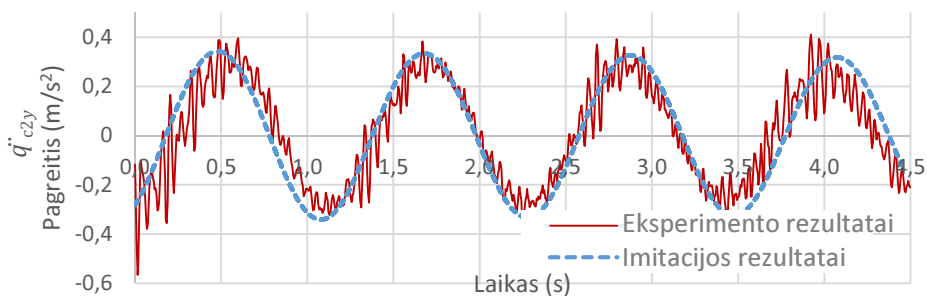


2.21 pav. Krano sistemos imitacijos rezultatai: a) – vežimėlio matematinės imitacijos rezultatai; b) – vežimėlio eksperimentinių matavimų rezultatai

Fig. 2.21. The results of quay crane system simulation: a) – the results of trolley mathematical simulation; b) – the results of trolley experimental measurements

Skaitinės imitacijos rezultatai pateikiami 2.21 paveiksle. Atliekat skaitinę imitaciją Y ašies pagreičio duomenys yra naudojami eksperimentiniams rezultatams palyginimui. Teoriniai rezultatai (2.21 paveikslas) rodo, kad griebtuvo pagreičio amplitudė kinta $0,35 \text{ m/s}^2$ ribose su periodu, kuris siekia apie 1,2 s. Atlikus krantinės krano dinamiųjų procesų teorinius skaičiavimus ir analizę, lygiai toks pat atvejis buvo atkartojamas ir laboratoriniame prototipe. Šio praktinio eksperimento

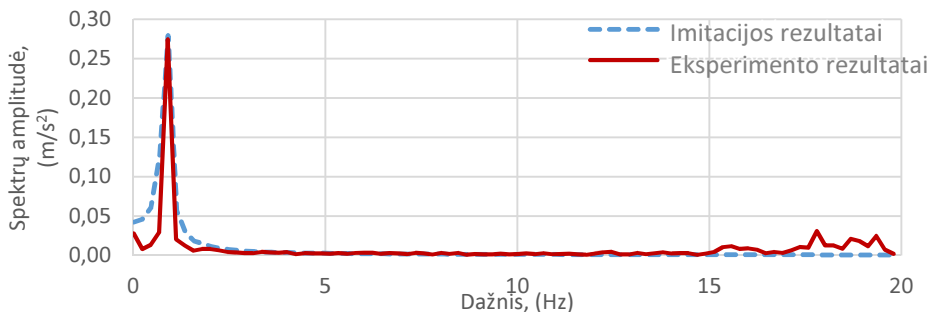
tikslas buvo nustatyti natūralius griebtuvo svyravimus ir svyravimus, kai atliekamas krovos procesas remiantis prieš tai aprašytais atvejais. Duomenų registravimo prietaisas „MIDE“ buvo sumontuotas ant griebtuvo viršaus (taip kaip parodyta 2.20 paveikslo antroje dalyje).



2.22 pav. Eksperimentinių matavimų ir imitacijos rezultatų palyginimas.

Fig. 2.22. The comparison of mathematical and experimental results

Gauti krantinės kranų griebtuvo judėjimo eksperimentiniai rezultatai, gauti griebtuvui judant pastoviu greičiu, pateikiami 2.16 paveiksle B dalyje. Dinamiame modelyje nevertinama kranų konstrukcijos, todėl eksperimentiškai gautuose rezultatuose matomas triukšmas. Eksperimentinio matavimo metu surinkti ir teoriškai gauti rezultatai yra panašūs.



2.23 pav. Eksperimentinių matavimų ir imitacijos spektrų palyginimas

Fig. 2.23. The comparison of mathematical and experimental spectrums

Siekiant patikrinti modelį, atliktas rezultatų palyginimas (2.22 paveikslas). Skaitinės imitacijos rezultatai pažymėti taškuota linija, o eksperimentiniai matavimai ištinine linija. Tam, kad visiškai įsitikinti ir patvirtinti sukurto matematinio

modelio rezultatus, atlikta spektrų analizė (2.23 paveikslas). Gauti spektrų analizės rezultatai rodo, kad eksperimentinių matavimų ir skaitinės imitacijos rezultatai sutampa. Matoma, kad rezultatuose vyrauja žemi svyravimų dažniai, kurie yra 0,89 Hz. Taip pat matome, kad eksperimentinio matavimo rezultatuose atsirado aukštų dažnių svyravimų. Maži neatitikimai 0–0,5 Hz ir 15–20 Hz ribose tarp eksperimentinių matavimų ir imitacijos rezultatų atsirado todėl, kad matematiname modelyje nevertinama visa krano konstrukcija per kurią galimai ir persiduoda savitasis variklio dažnis. Eksperimentiniuose rezultatuose matosi variklio sukeltos aukšto dažnio vibracijos.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Daugumos mokslininkų modeliuose vertinamos tik su jų darbu siejamos problemos, tokias kaip krovinio svyravimai ar konteinerio svyravimas tam tikroje situacijoje (Maneeratanaporn & Murakami, 2012; Z. N. Masoud, 2005; Ziyad N. Masoud, 2009; Ranjbari & Shirdel, 2015), vėjo sukelti svyravimai ir jų įtaka krovos procesui (Tomczyk *et al.*, 2014) ar panašios sritys. Daugumoje tokio pobūdžio darbų pateikiami modeliai yra vienkartinio panaudojimo.
2. Disertacijoje aprašytas matematinis modelis gali būti pritaikytas ir naudojamas daugumai skirtingų dinaminių ir kompleksinių problemų sprendimui konteinerių transportavimo procese. Šiame modelyje yra kėlimo mechanizmo ir aštuonių lynų sistema, sujungta su vežimėliu ant kurių kabo griebtuvas. Taip pat modelyje, atsižvelgiant į kitų autorių darbus (Yoshihara *et al.*, 2003; Tanaka *et al.*, 2008), vertinamos lynų elastingės savybės bei elektriniai varikliai ir jų pereinamieji procesai.
3. Lyginant su panašiu Yang Pan matematiniu modeliu (Pan *et al.*, 2011) disertacijoje papildomai vertinami rato praslydimai. Įvertinamos visos veikiančios jėgos krano greitėjimo metu, atsirandančios per pirmąsias 300 ms. Bendra krano greitėjimo trukmė siekia 0,5 sekundės. Pritaikius atitinkamus minimalius pakeitimus sukurtą matematinį modelį galima pritaikyti daugiakriterinėms kompleksinėms problemoms spręsti (Sivilevičius, 2011).
4. Gauti vežimėlio judėjimo imitacijos rezultatai rodo, kad matematinis krantinės krano modelis veikia ir atitinką laboratorinį prototipą. Teorinis modelis suprojektuotas taip, kad juo būtų galima imituoti pagrindines krovos operacijas, atliekamas krantinės kranuose, kuriuose vienu metu dirba visi krano mechanizmai.

Krantinės kranų laboratorinio prototipo ir jo valdymo algoritmo projektavimas bei krovos proceso efektyvumo tyrimai

Šiame skyriuje pateikiamas valdymo sistemos modelis bei aprašomi atlikti eksperimentiniai tyrimai. Įvardinti pagrindiniai, eksperimentiniams tyrimams, sukurti kranų modelio komponentai. Atliekant virtualių modeliavimą nustatytas sistemos funkcionalumas, įvertinanti krovinių svyravimai. Pagal tyrimo ir virtualaus modeliavimo rezultatus sukurtas funkcionuojantis kranų laboratorinis prototipas bei pritaikyta ir įdiegta valdymo techninė bei programinė įranga. Taip pat pateiktos valdymo komponentų ir algoritmų blokinės diagramos. Remiantis 1-ojo skyriaus analize bei 2-ojo skyriaus skaičiavimais ir atsižvelgiant į kitų mokslininkų rekomendacijas, sukurtas kompiuterinis valdymo modelis, kuris panaudotas PID valdiklio dedamųjų nustatymui. Įvertinti ir konteinerio svyravimai prie skirtingų PID dedamųjų parametrų verčių. Sukurtos valdymo sistemos efektyvumo palyginimui buvo atlikti moksliniai eksperimentiniai tyrimai vertinant skirtingus krovinių parametrus bei jų įtaką konteinerio svyravimams.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Eglėnas *et al.* (2012), Ruibys *et al.* (2013), Kiseliovas *et al.* (2014), Eglėnas *et al.* (2015), Andziulis *et al.* (2016).

3.1. Krantinės krano laboratorinio prototipo sukūrimas eksperimentiniams tyrimams





Konteinerių krovos proceso efektyvumas priklauso nuo krovos greičio. Kuo jis didesnis, tuo konteinerinio krantinės krano efektyvumas laikomas didesniu – atitinkamai gerėja ir terminalo charakteristikos. Nusakant terminalo pajėgumus akcentuojamas krovos greitis. 2.2 ir 2.3 poskyriuose aprašytas krantinės krano kėlimo mechanizmo matematinis modelis buvo lyginamas su eksperimentiškai gautais laboratorinio krantinės krano duomenimis, kurių rezultatai leidžia patikrinti sukurtą modelį. Tačiau norint integruoti į krantinės krano valdymo sistemą moderniosiomis technologijomis, apžvelgtomis 1.3 poskyryje, paremtus valdymo algoritmus, būtinas didesnio mastelio krantinės krano griebtuvo ir kėlimo mechanizmo prototipas. Esamas mažo mastelio prototipas dėl savo konstrukcinių savybių tolimesniems eksperimentiniams tyrimams yra nepritaikytinas, todėl, atlikus skaičiavimus ir įvertinus esamo modelio parametrus, buvo sukurta testavimo platforma disertacijoje nagrinėjamai problemai spręsti.

Pirmojoje krantinės krano prototipo kūrimo stadijoje buvo sukurta konstrukcija, atsižvelgiant į mažo mastelio prototipo parametrus bei skaičiavimų rezultatus, aprašytus 2.3 poskyryje. Kompiuteriniam modeliavimui ir imitacijai pasirinkta kompiuterinio projektavimo (CAD) ir imitacinė programa „SolidWorks“. Ši programa leidžia kurti įvairius modelius ir juos testuoti naudojant skirtingus imitavimo įrankius – oro srauto pasipriešinimo, detalių skysčių aptakumo, atsparumo veikiant tam tikroms jėgoms, judesio ir t. t. Pagal testavimo rezultatus yra numatyta galimybė atlikti atskirų detalių optimizavimą, kurio metu pakeičiamos tam tikros modelio sritys, kad geriau atitiktų parinktus kriterijus. Imitacijos rezultatai gali būti pateikiami grafiškai ar net tekstiniuose failuose. Darbe atliktam virtualiam modeliavimui naudojama programinio paketo versija SolidWorks 2014, su papildiniu Geartrax 2014, kuris skirtas palengvinti įvairių pavarų, krumpliaračių ir sraigčių 3D modelių kūrimą.

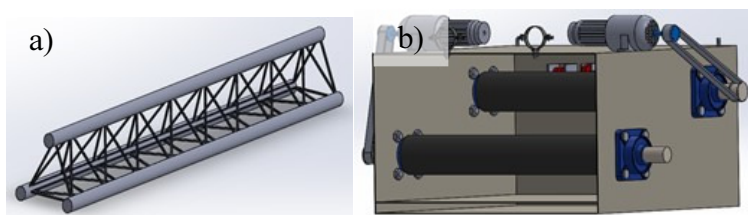
3.1.1. Krantinės krano prototipo virtualus projektavimas

Konteinerinių krantinės krano prototipo virtualiam projektavimui buvo pasinaudota Solidworks 2014 aplinka su detalių bibliotekomis ir SolidWorks Motion, Geartrax, bei kitais papildiniais. Krantinės krano griebtuvo ir kėlimo mechanizmo sukūrimui Solidworks įrankių biblioteka buvo papildyta pagrindiniais komponentais, parodytais 3.1 lentelėje. Prieš projektuojant didesnio mastelio laboratorinį krantinės krano prototipą buvo atlikti krano dinaminio procesu teoriniai tyrimai (2 skyrius) siekiant išsiaiškinti kokie parametrai įtakoja dinamiką.

3.1 lentelė. Krantinės kran virtualaus modelio pagrindiniai elementai**Table 3.1.** The main components of virtual quay crane model

Elemento pavadinimas	Elemento virtualus modelio vaizdas	Elemento pavadinimas	Elemento virtualus modelio vaizdas
L formos aliuminis profilis 50×20×2 mm		Guminis ratukas	
L formos aliuminis profilis 20×20×2 mm		U formos profilis 50×50×3 mm	
Įtvirtintas kampas 40×60×3000 mm		Vamzdžio laikiklis	
Spausdintas plastmasinis ratukas (R = 20 mm)		Guolis	
Būgnas trosu sukimui			

Jungiant šiuos komponentus tarpusavyje įvairiais ryšiais, gaunamas kuriamos detalės modelis, iš kurių vėliau surenkamas krantinės kranas. Virtualaus modelio sukūrimui taip pat naudojami ir smulkesni komponentai – varžtas, veržlė, tarpinė, ir kt., tačiau atsižvelgiant į konstrukcinius parametrus ir jų svarbą, lentelėje pateikiama tik pagrindiniai komponentai, kurie nepateikiami programos duomenų bazėje.

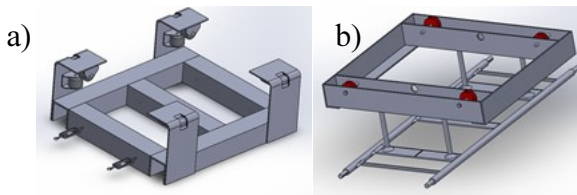


3.1 pav. Virtualaus modelio elementai: a) vežimėlio kreipiantieji bėgiai;
b) variklių dėžė

Fig. 3.1. Components of virtual model: a) trolley guide rails; b) motors box

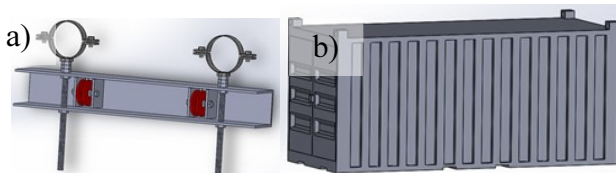
Panaudojant komponentus ir turimus elementus programoje buvo sujungti atskiri stambesni detalių surinkimo komplektai. Kadangi krantinės kranų modelį sudaro daugelis atskirų komponentų, tai juos galima suskirstyti į kelis stambesnius detalių surinkimo komplektus: kranų vežimėlio bėgiai, variklių dėžė, vežimėlis, griebtuvas, galinė lynų įtempimo dalis ir konteineris.

Kranų modelio kreipiantieji bėgiai, sukurti pagal tikros trikampės aliuminio konstrukcijos skirtos realiam kranų modeliui kūrimui, matmenis, kuri atstoja kranų vežimėlio bėgines kreipiančiąsias (3.1a paveikslas). Šia bėgine konstrukcija vežimėlis juda Y ašimi. Variklių dėžė – tai keturkampė konstrukcija, su joje įmontuotais būgnais trosų sukimui, guoliais, ištekintais ratukais, vamzdžio laikikliais bei ant dėžės sumontuotais varikliais (3.1b paveikslas), kurie per diržinę pavarą sujungti su varomaisiais būgnais.



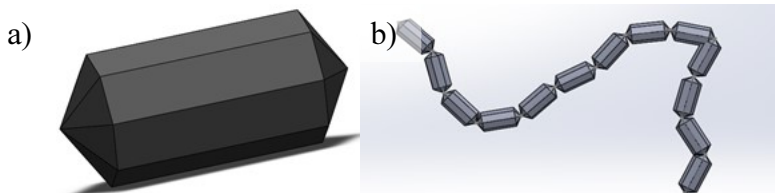
3.2 pav. Virtualaus modelio elementai: a) vežimėlis; b) griebtuvas
Fig. 3.2. Components of virtual model: a) trolley; b) spreader

Krantinės kranų laboratorinio prototipo vežimėlis (3.2a paveikslas) sukonstruotas iš aliuminio profilių ir kampu sujungtų stačiakampe detale su dviejų rūšių ratukais bei trosų įtempimo kilpomis. Vežimėlis juda Y ašimi kreipiančiosiomis, gabendamas krovinį pirmyn ir atgal, bei veikia kaip kreipiančioji konstrukcija krovinio kilnojimui aukštyn ir žemyn. Griebtuvas (3.2b paveikslas) iš aliuminio profilių sujungtas stačiakampe detale su ištekintais riedmenimis, geležies strypais bei geležinėmis plokštelėmis. Šioje dalyje pritvirtinamas (realiuose kranuose sugriebiamas) konteineris.



3.3 pav. Virtualaus modelio elementai: a) galinė lynų įtempimo dalis;
b) konteineris
Fig. 3.3. Components of virtual model: a) the rear part of the ropes tension;
b) container

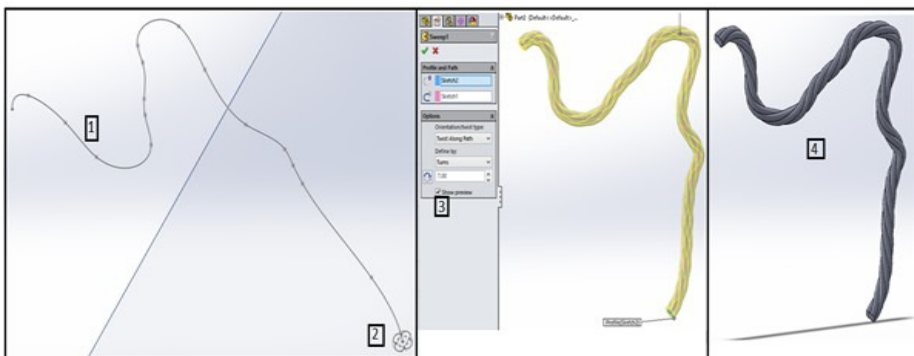
Galinė lynų įtempimo dalis (3.3a paveikslas) sudaryta iš aliuminio profilių, vamzdžio laikiklių, ratukų, bei trosų įtempimo kilpų. Reguluojant įtempimo įrenginius įtempiami iki reikiamo tamprumo vežimėlio judėjimui skirti lynai. Konteineris (3.3b paveikslas) sumodeliuotas pagal realaus pagaminto krano prototipo konteinerio matmenis, tačiau pritaikant jam tikro dydžio konteineriams panašią išvaizdą. Krovos proceso imitacija reikalingi skirtingi krovinių parametrai, todėl į konteinerio vidų skirtingiems imitacijos bandymams įdedamas kubas užpildantis konteinerio vidaus ertmę. Šiam kubui galima priskirti specifinius parametrus, imituojančius gabenamą krovinį, pavyzdžiui priskyrus vandens savybes, imitacijos metu bus imituojamas skysto krovinio transportavimas.



3.4 pav. Virtualaus modelio elementai: a) lyno elementariojo komponento virtualus modelis; b) ekvivalentinė lyno grandinė

Fig. 3.4. Components of virtual model: a) the virtual model of rope elementary component; b) equivalent rope chain

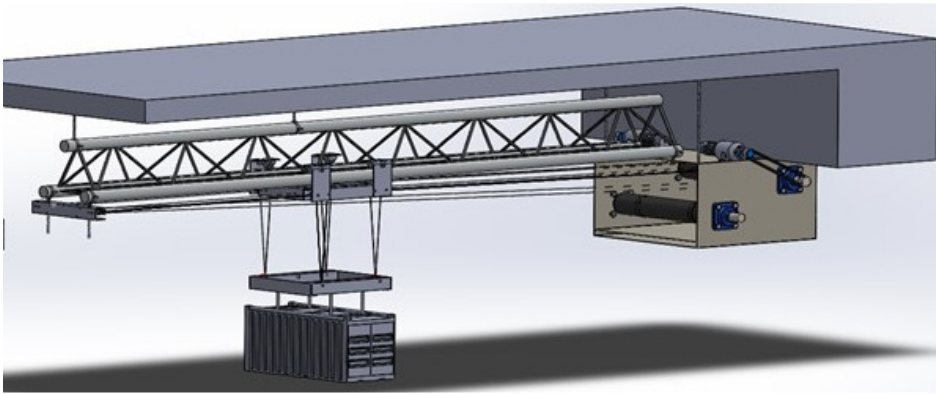
Vienas iš svarbesnių sukurtos sistemos komponentų yra lynas, kuris labai svarbus siekiant atlikti prie realybės priartintą sistemos imitaciją (J. Zhang, Zhao, Yi, & Yu, 2008; X. Zhang, Yi, Zhao, & Yang, 2007).



3.5 pav. Lyno formavimo etapai virtualioje aplinkoje
Fig. 3.5. The rope design stages in a virtual environment

SolidWorks programinis paketas leidžia suformuoti tik uždarus diržus ir grandines, o atskiros funkcijos lyno formavimui nėra, tai trosus reikia formuoti iš atskirų mažų komponentų. Pirmiausiai sukuriamas lyno elementariojo komponento virtualus modelis (3.4a paveikslas). Kiekvienas figūros galas naudojant „*Mate reference*“ funkciją padaromas laisvai prijungiamu, kad sujungus elementariusius lyno komponentus galima suformuoti norimo ilgio grandinę (3.4b paveikslas). Atlikus imitacijos proceso veiksmus, importuojamas šios grandinės judėjimas iš judėjimo analizės. Tada naudojant *Spline* funkciją apibrėžiama šios grandinės forma pažymėta (3.5 paveikslas – 1) 1 numeriu. Gauta linija atidaroma kitame lange, linijos galo taške pridėdama nauja plokštuma, ant kurios pradėdama formuoti trosų pavidalas.

Šiuo atveju nubrėžiami keturi apskritimai, kurie „*Trim*“ funkcijos pagalba paverčiami vientisu brėžiniu (3.5 paveikslas – 2). Tada naudojant funkciją „*Swept Boss/Base*“, pažymimos 1 ir 2 numeriais pažymėtos sritys, gaunama keturių gijų linija, kuriai parenkamas susukimų skaičius (3.5 paveikslas – 3) numeriu pažymėtoje srityje, gaunamas rezultatas iš keturių gijų supintas trosas, (3.5 paveikslas – 4) numeriu pažymėta sritis.

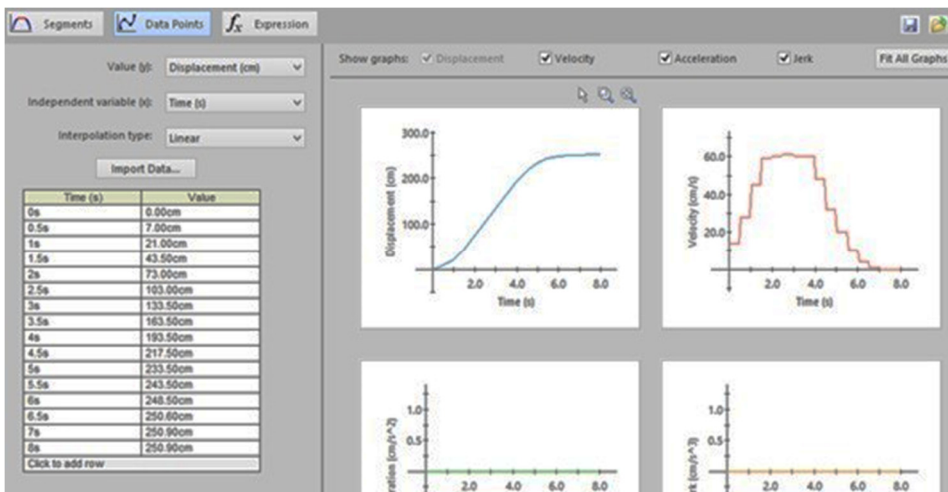


3.6 pav. Galutinis krantinės krano griebtuvo ir kėlimo mechanizmo modelis
Fig. 3.6. Finished model of quay crane spreader and lifting mechanism

Visas šias detales sujungus tarpusavyje gaunamas surinktas krantinės krano modelis. Tam tikros detalės sujungiamos trosais tam, kad vėliau būtų galima imituoti krano modelio judėjimą vykdant konteinerių krovą krovos. Į modelį taip įtraukiamas ir lubų imitacinis modelis su elementais, laikiniais virtualų krano modelį prie lubų. Galutinis krantinės krano modelis pavaizduotas 3.6 paveiksle.

3.1.2. Krantinės kranų vežimėlio su konteineriu judėjimo imitavimas

Konteinerių transportavimo proceso imitavimas atliktas naudojant SolidWorks programinio paketo papildinį SolidWorks Motion. Šia programa atliktas viso kranų mechanizmo judėjimo imitavimas. Judėjimo analizės dialogo lange, visų pirma, nustatoma žemės traukos ir laisvojo kritimo pagreitis lygus $9,8067 \text{ m/s}^2$. Tada nustatomi judėjimo parametrai, panaudojant variklio judesio funkcijas (3.7 paveikslas), kurios vežimėliui parenkamos judėjimo charakteristikos. Išplėtinuose nustatymuose surašomi išsamūs imitacijos veiksmai: judėjimo trukmė, atstumas, bei greitėjimo ir lėtėjimo parametrai.

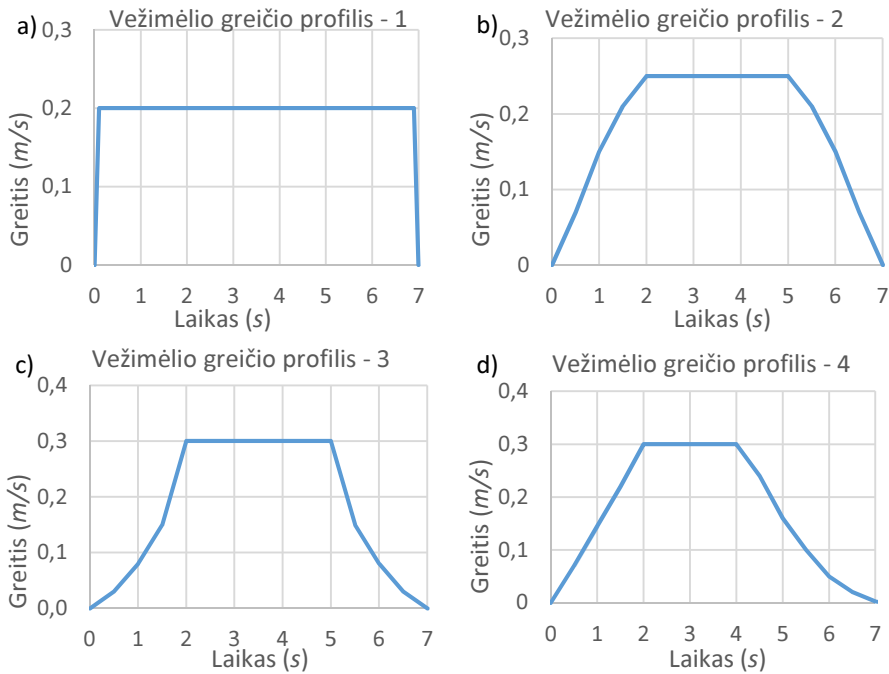


3.7 pav. Vežimėlio variklio parametų langas
Fig. 3.7. Trolley motor motion settings window

Variklio parametų lange, parenkami konteinerių keliančio variklio nustatymai. Panaudojus visas judėjimo analizavimui reikalingas funkcijas ir veiksmus, atliekami skaičiavimai, kurių rezultatai atvaizduojami grafiškai.

Imitacijai buvo pasirinkti keturi greičio profiliai, siekiant nustatyti krovinio svyravimų intensyvumą vežimėlio judėjimo metu. Pirmuoju bandymu nustatytas trapecinis greičio profilis. Greitėjimo ir lėtėjimo fazių trukmė mažiausia ir siekia vos 0,1 s, o pasiekus 0,2 m/s greitį. Vežimėlis juda pastoviu greičiu. Antruoju atveju naudojamas pakopinis greičio profilis trapecinio pagrindu. Minėtu atveju vežimėlis greitėjimo ir lėtėjimo fazių trukmė siekia 2 s. Didžiausias greitis 0,25 m/s. Trečiuoju atveju taikomas S-profilis. Greitėjimo ir lėtėjimo fazių trukmė

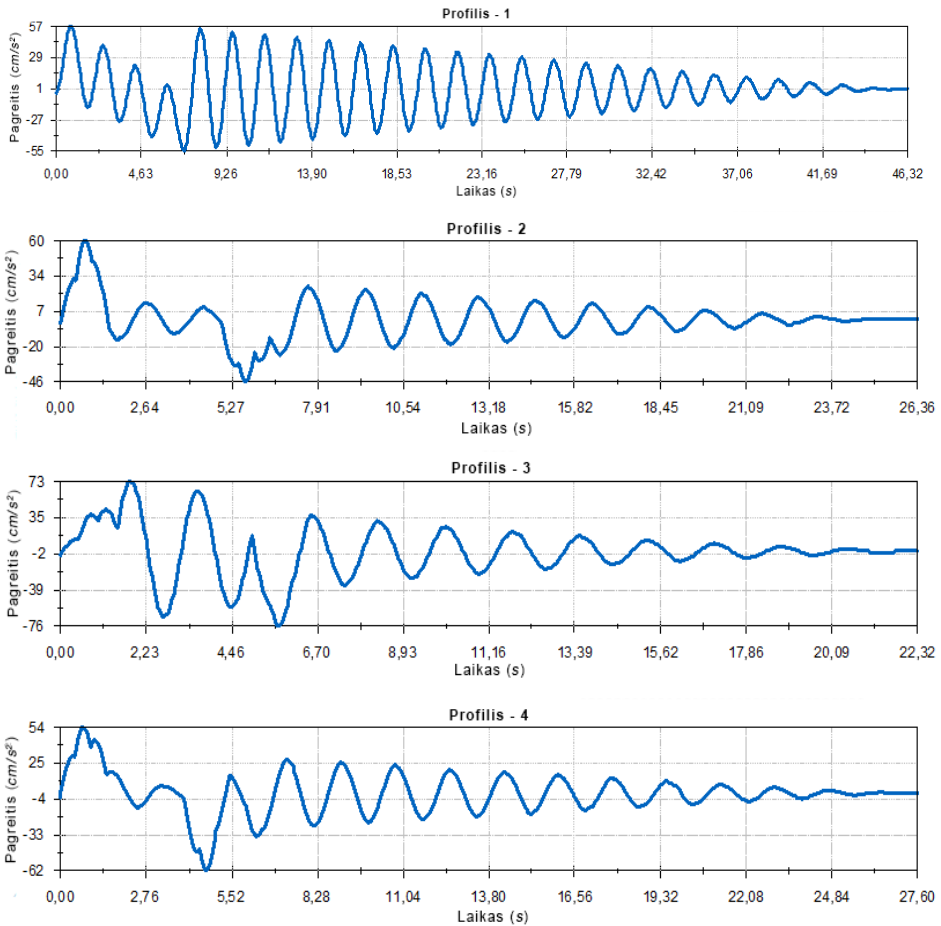
taip pat siekia 2 s, tačiau maksimalus greitis 0,3 m/s. Ketvirtuoju atveju kombinuojamas trapezinis greičio kitimo profilis, tačiau taikant skirtus greitėjimo 2 s ir lėtėjimo 3 s laikus, išlaikant didžiausią 0,3 m/s greitį. Greičio profilių, naudojamų imitacijos metu, grafinė interpretacija pateikta 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Greičio profiliai naudojami imituojant judėjimą: a) staigus greitėjimas, lėtėjimas; b) simetriška greitėjimas, lėtėjimas; c) pakopinis greitėjimas, lėtėjimas; d) nesimetriškas greitėjimas, netolygus lėtėjimas

Fig. 3.8. Velocity profiles used for simulation: a) instant acceleration, deceleration; b) symmetric acceleration, deceleration; c) cascade acceleration, deceleration; d) asymmetric acceleration, deceleration

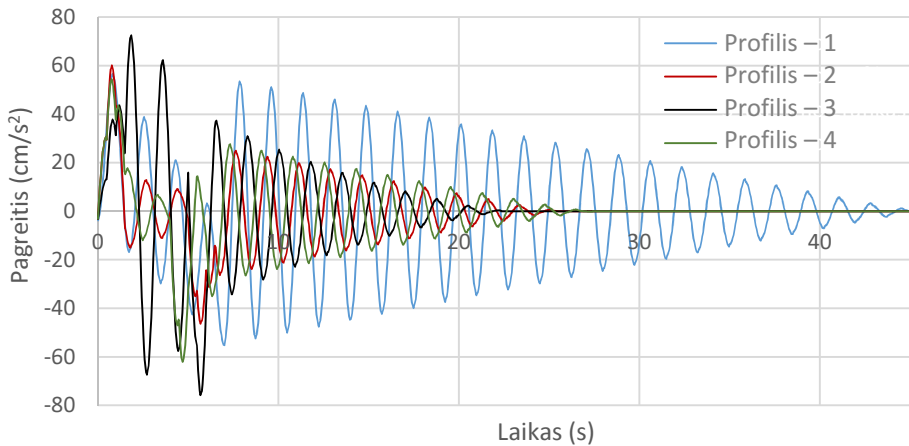
Krovinio transportavimo imitavimas atliekamas naudojant aprašytus greičio profilius, kai gabenamas tuščias konteineris. Imitacijos rezultatai rodo, kad vėžimėliui pradėjus judėti, kroviny s vėluoja, taip sukeldamas išliekamuosius svyravimus, kurie aprašyti 1 skyriuje. Šios imitacijos tikslas – nustatyti ar kran o komponentai sujungti taip, kad sistema funkcionuotų. Rezultatai, gauti imitacinėje programoje taikant 3.8 paveiksle pavaizduotus greičio profilius, pateikti 3.9 paveiksle, o jų palyginimas pateikiamas 3.10 paveiksle.



3.9 pav. Imitacijos rezultatai gauti taikant skirtingus greičio profilius

Fig. 3.9. Simulations results of applying different velocity profiles

Gauti rezultatai reprezentuoja konteinerio svyravimus Y ašimi. Taip pat patvirtina 1 skyriuje apžvelgtas problemas, kuriose teigiama, kad svyravimams didžiausią įtaką turi vežimėlio judėjimo greičio profilis. Didžiausią įtaką krovos procesui daro vežimėlio judėjimo greitis tam tikru laiko momentu, kadangi nuo to, priklauso konteinerio išliekamųjų svyravimų trukmė. Kiekvieno matavimo duomenys buvo išsaugoti išorinėje duomenų rinkmenoje, kuriuos vėliau naudojant atvaizdavimo įrankius, pateikti viename grafike (3.10 paveikslas).



3.10 pav. Krovinio svyravimo rezultatų palyginimas, taikant skirtingus vežimėlio judėjimo greičio profilius

Fig. 3.10. Simulation results comparison of cargo oscillations using different trolley motion profiles

Remiantis bendru grafiku (3.10 paveikslas) galima teigti, kad transportuojant konteinerį, kai taikomas pirmasis greičio profilis (3.8a paveikslas), susidaro didžiausi konteinerio svyravimai. Šie svyravimai trunka ilgiausiai (~45 sekundės) ir ta svyravimo trukmė du kartus skiriasi nuo kitų imitacijos rezultatų (vidutinė svyravimų trukmė siekia ~25 sekundes). Didžiausią svyravimo amplitudę transportavimo pradžioje pasiekia, tačiau greičiausiai nustoja svyruoti, konteineris, kurio transportavimui naudotas 3 greičio profilis (3.8c paveikslas).



3.11 pav. Krano griebtuvo ir kėlimo mechanizmo laboratorinis prototipas
Fig. 3.11. The laboratory prototype of crane spreader and lifting mechanism

Atlikus krantinės kranų griebtuvo ir kėlimo mechanizmo imitavimą ir nustatant, kad sukurtas modelis veikia ir tenkina tolimesniems tyrimams keliamus reikalavimus, pagal virtualaus krantinės kranų modelio brėžinius buvo pagamintas ir krantinės kranų kėlimo mechanizmo ir griebtuvo sumažinto dydžio laboratorinis prototipas. Įvertinus virtualaus krantinės kranų kėlimo mechanizmo ir griebtuvo modelio imitacijos rezultatus, atsižvelgiant į projektavime naudotas medžiagas ir matmenis, sukurtas laboratorinis krantinės kranų prototipas pavaizduotas 3.11 paveiksle. Daugiau šio prototipo nuotraukų pateikiama priede (B priedas).

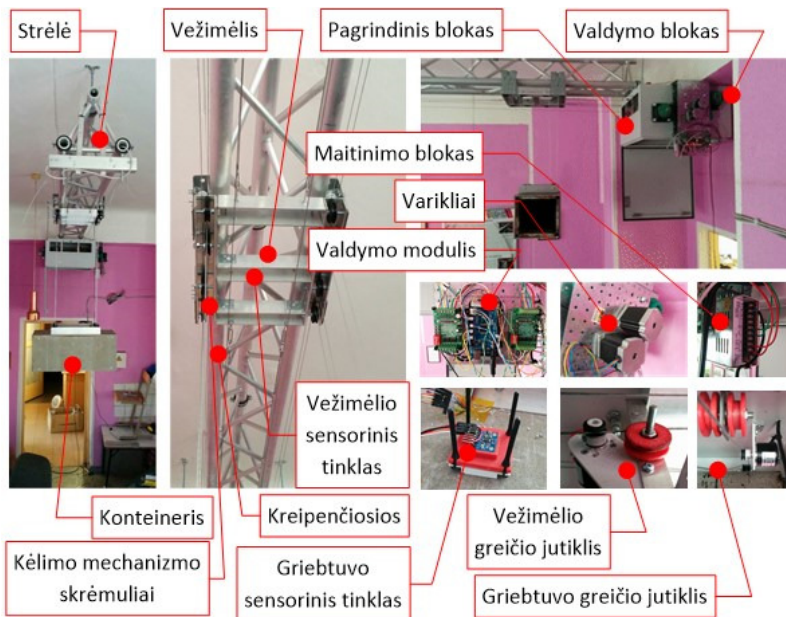
3.2. Krantinės kranų laboratorinio prototipo valdymo sistemos kūrimas

Pastaraisiais metais mokslininkai vis dažniau nagrinėja krantinės kranus. Viena iš problemų, su kuria susiduriama dažniausiai, tai konteinerių kėlimo kranų valdymo algoritmų kūrimas ir taikymas optimizuojant esamas sistemas (C. Chang *et al.*, 2008; Chao & Lin, 2011; Schaub, 2008; Tanaka *et al.*, 2008; Zhi-jun *et al.*, 2012). Iki šios dienos yra sukurta daug įvairiausių valdymo algoritmų, kurie išsprendžia atskiras problemas (Cao & Liu, 2011; D. Chang *et al.*, 2010; Fang *et al.*, 2012; Schaub, 2008), tačiau vis dar išlieka poreikis kompleksinių algoritmų kūrimui, kurie orientuoti ne tik į atskiras krovos procedūras, bet ir į pilną „laivas – krantas – laivas“ krovos ciklą. Dažnai naujų krantinės kranų valdymo algoritmų kūrimas (Yoshihara *et al.*, 2003) yra siejamas su uždavinių sprendimu, kuriuose yra bandoma išspręsti konteinerio svyravimų problemą, kurių atsiradimo priežastys kiekvienu atveju gali būti skirtingos (Sano *et al.*, 2010; Tanaka *et al.*, 2008). Kartais svyravimai yra sukelti paties kranų mechanizmo, kaip variklio, ar nelygus bėgių paviršius, kuriais juda įrenginiai (modeliavimo rezultatai aprašyti 2.1 poskyryje). Tačiau pasitaiko ir atvejų, kai svyravimų priežastys nežinomos – jas gali sukelti kompleksinis poveikių, veikiančių į konteinerio plotą ar net pačiame konteineryje rinkinys.

Blogai parinktas kėlimo mechanizmo ar vežimėlio valdymo algoritmas bei netinkamai įvertinti konteinerių veikiantys išoriniai veiksniai įtakoja konteinerio ir jame esančio krovinių saugumą. Šiame poskyryje aprašomas krantinės kranų valdymo sistemos matematinis modelis ir modeliavimo rezultatai taikant S-formos įėjimo profilį su PID valdikliu. Siekiama nustatyti optimalius PID valdiklio koeficientus, kuriuos atitinkamai suderinus, būtų galima kontroliuoti atsirandančius svyravimus. Net ir vieno valdymo sistemos elemento disbalansas gali turėti turi didelę įtaką visos kranų valdymo sistemos veikimui.

3.2.1. Krantinės kranų prototipo struktūra

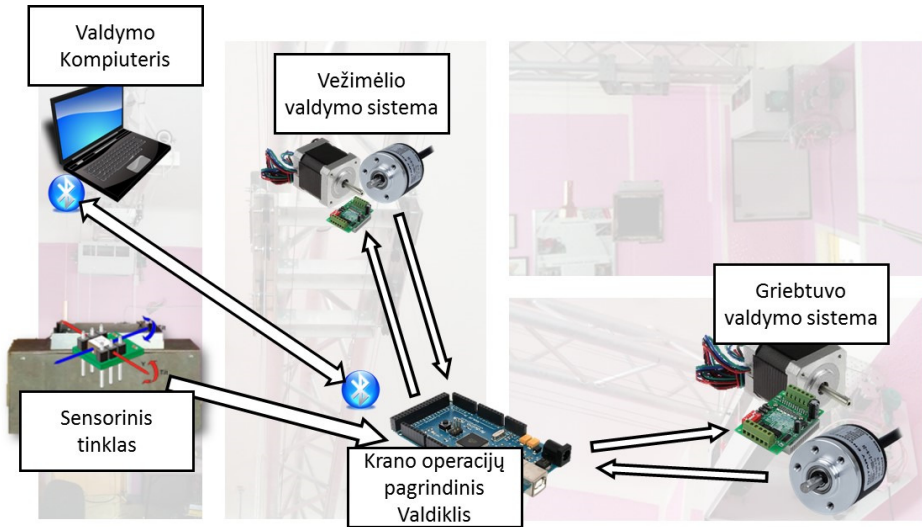
Prieš tai aprašytame 3.1 poskyryje suprojektuotas ir ištestuotas krantinės kranų vežimėlio kėlimo mechanizmo laboratorinio mastelio virtualus prototipas, kuriame įvertinus visas charakteristikas bei atsižvelgiant į 2 skyriuje atliktus skaičiavimus buvo sukurtas virtualaus prototipo realus modelis, skirtas tolimesniems eksperimentiniams tyrimams atlikti. Šio laboratorinio prototipo pagrindinė struktūra pateikiama 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Krantinės kranų prototipo pagrindiniai sistemos komponentai

Fig. 3.12. The main system components of quay crane prototype

Laboratorinio krantinės kranų strėlė pritvirtinta sąlyginai lanksčia jungtimi prie laboratorijos lubų. Strėlės apatiniai bėgiai atstoja kreipiančiąsias, skirtas horizontaliam vežimėlio judėjimui. Vežimėlio viršutinėje dalyje sumontuotas jutiklinis tinklas vežimėlio judesiams ir pozicijai matuoti. Apatinėje dalyje skriemuliai skirti griebtuvui su kroviniu kėlimui. Griebtuvo viršutinėje dalyje taip pat sumontuotas jutiklinis tinklas, registruojantis jo svyravimo kampą, greitį ir poziciją. Griebtuvas ir kėlimo mechanizmas valdomi per pagrindinį bloką, kuriame sumontuotos perdavimo pavaros bei įdiegta elektroninė automatinio valdymo sistema. Šia sistemą sudaro valdymo modulis, varikliai, vežimėlio ir griebtuvo greičio jutikliai bei maitinimo šaltinis. Prototipo supaprastintas valdymo sistemos modelis pateikiamas 3.13 paveiksle.

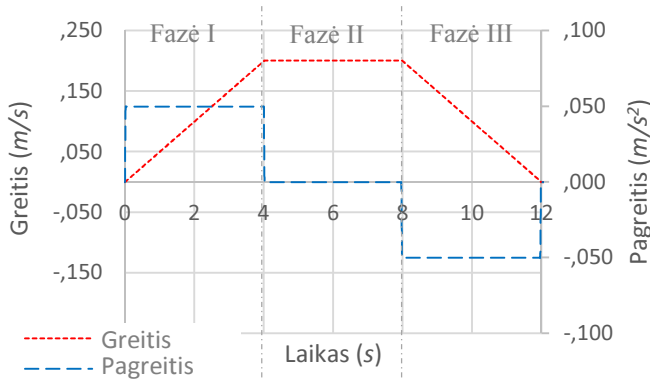


3.13 pav. Krantinės krano valdymo sistemos pagrindiniai komponentai
Fig. 3.13. The main components of quay crane control system

Šią supaprastintą valdymo sistemą sudaro jutiklinis tinklas, vežimėlio ir griebtuvo valdymo posistemės, pagrindinis valdiklis krano operacijoms atlikti ir valdymo kompiuteris duomenų perdavimui, valdymo užduočių siuntimui ir stebėjimui, kurioje, laboratoriniame prototipe komunikacija užtikrinama belaidžiu (angl. *Bluetooth*) ryšiu.

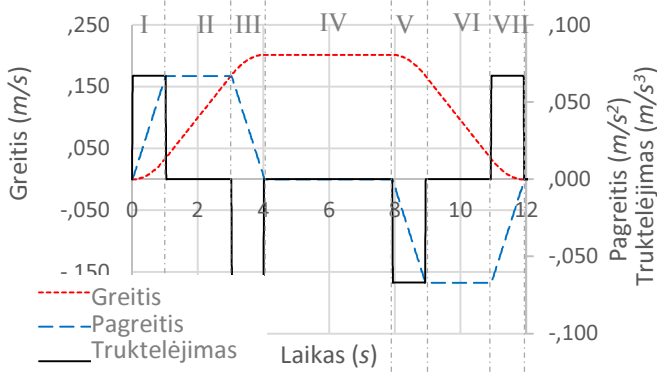
3.2.2. Greičio profilio parinkimas valdiklio įėjimo formavimui – eksperimentinis tyrimas

Atlikus virtualius krantinės krano kėlimo mechanizmo ir griebtuvo sistemos patikrinimus bei sukonstravus laboratorinį prototipą eksperimentiniams tyrimams atlikti, būtina sumodeliuoti krantinės krano valdymo sistemą kompiuterinėje aplinkoje. Šiuo atveju naudotas MatLab imitacinis paketas Simulink, kuriame ir atliktas valdymo sistemos kūrimas (pateiktas 3.2.3 poskyryje). Valdymo sistemos užduoties signalas užprogramuotas taikant greičio kitimo profilį, kuris parinktas atlikus šiame poskyryje aprašytus eksperimentinius tyrimus.



3.14 pav. Trapecinis greičio kitimo profilis

Fig. 3.14. Trapezoidal velocity profile

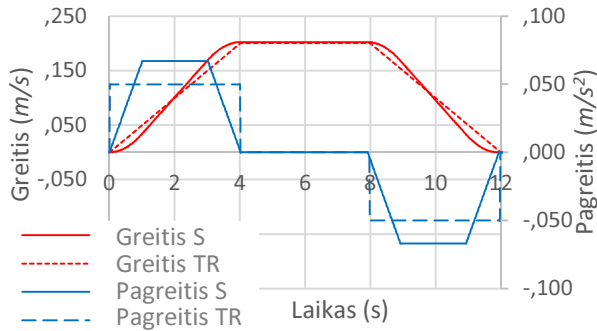


3.15 pav. S-formos greičio kitimo profilis

Fig. 3.15. S-shaped velocity profile

Remiantis atlikta mokslinės literatūros analize (1 skyrius) ir įvertinus PID valdiklio efektyvumą tokio tipo krano valdymo sistemose, nuspręsta, visų pirma, pasirinkti tinkamą greičio kitimo profilį įėjimui, kuris bus kombinuojamas su PID valdikliu, skirtu krantinės krano transportavimo proceso valdymui. Minėto įėjimo profiliavimo metodo pasirinkimui atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių metu palygintas dviejų greičio profilių efektyvumas vertinat konteinerio išliekamuosius svyravimus.

Aukščiau esančiuose paveiksluose pateikiamos trapecinio (3.14 paveikslas) ir S-formos (3.15 paveikslas) greičio profilių charakteristikos naudotos eksperimentiniame tyrime.



3.16 pav. Trapecinio ir S-formos greičio kitimo profilio palyginimas
Fig. 3.16. The comparison of Trapezoidal and S-shaped velocity profiles

Siekiant palyginti šiuos profilius tarpusavyje buvo atlikti matematiniai skaičiavimai atsižvelgiant į krano judėjimo greitį, kėlimo galia ir kitas charakteristikas bei nustatant panašius greitėjimo ir lėtėjimo parametrus. Šių profilių tarpusavio palyginimas pateikiamas 3.16 paveiksle. Pradiniai greitėjimo ir lėtėjimo nustatymai abiem tirtais atvejais Y ašimi yra $t_{acc} = 4$ sekundės, tai atitinka sinchroninį greičio profilį. Trapecinio greičio profilio pagreitis apskaičiuojamas:

$$a_{TR} = \frac{v_{max}}{t_{acc}}. \quad (3.1)$$

S-formos greičio profilio maksimalus galimas pagreitis apskaičiuojamas:

$$a_{max} = \frac{a_{TR}}{1 - (j_{\%} \cdot 0,005)^2} \quad (3.2)$$

čia $j_{\%}$ = pasirenkama pradinė truktelėjimo reikšmė kuri yra lygi 50% nuo pradinės reikšmės. Truktelėjimo konstanta apskaičiuojama:

$$j = \frac{2 \cdot a_{max} \cdot 100}{t_{acc} \cdot j_{\%}}. \quad (3.3)$$

Jerk'o reikšmė priklauso nuo S-profilio fazes ir ji gali būti 0, j , $-j$.

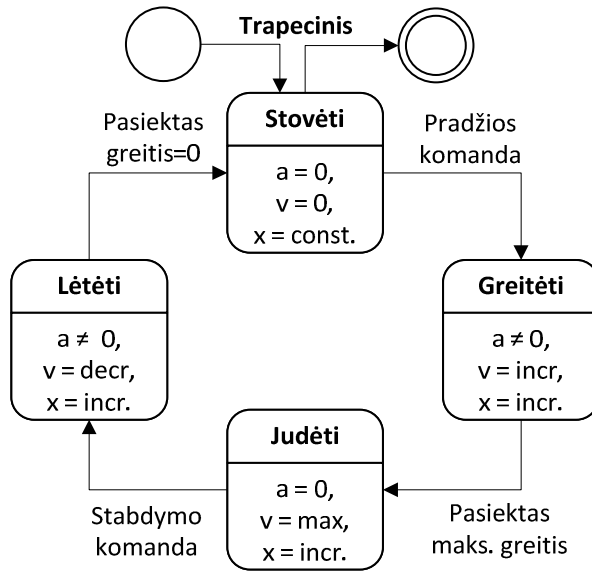
Krantinės krano valdymo sistema perskaičiuoja pagreitį, greitį ir poziciją kiekviename laiko intervale.

$$a = a_0 + j \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

$$v = v_0 + a_0 \cdot \Delta t + \frac{j \cdot \Delta t^2}{2} \quad (3.5)$$

$$x = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{a_0 \cdot \Delta t^2}{2} + \frac{j \cdot \Delta t^3}{6} \quad (3.6)$$

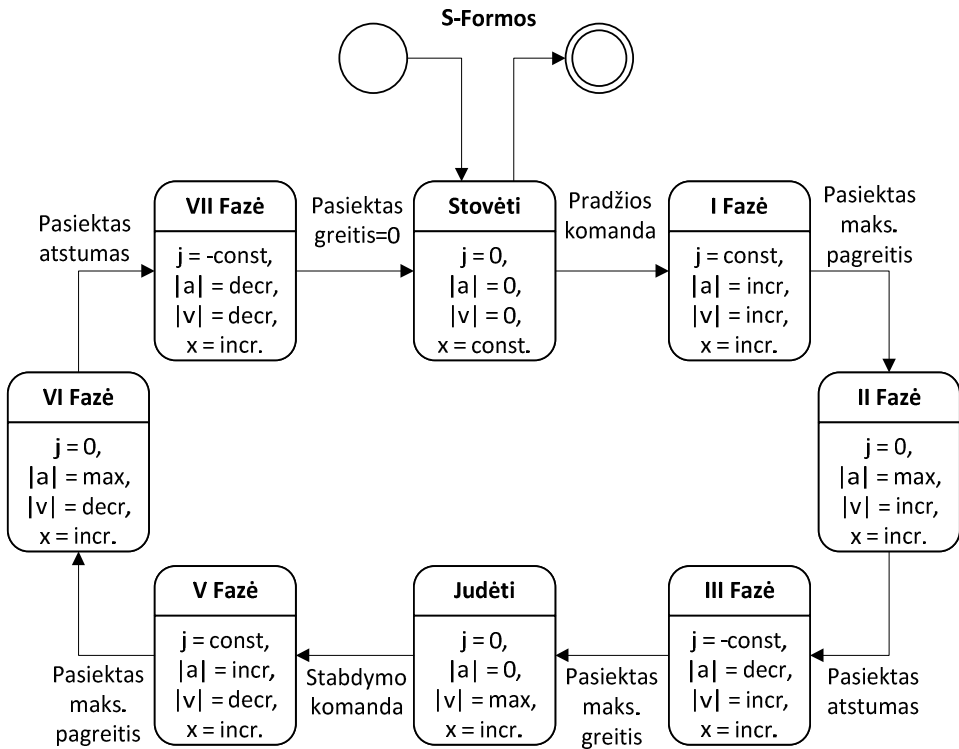
čia a_0 – prieš tai buvusi pagreičio vertė, Δt – laiko intervalas, v_0 – prieš tai buvusi greičio vertė, x_0 – prieš tai buvusios pozicijos reikšmė. Skaičiavimai realizuoti Arduino valdymo modulyje. Greičio profilio veikimas paremtas būsenų diagramomis.



3.17 pav. Trapezinio greičio kitimo profilio būsenų schema
Fig. 3.17. State machine diagram for trapezoidal velocity profile

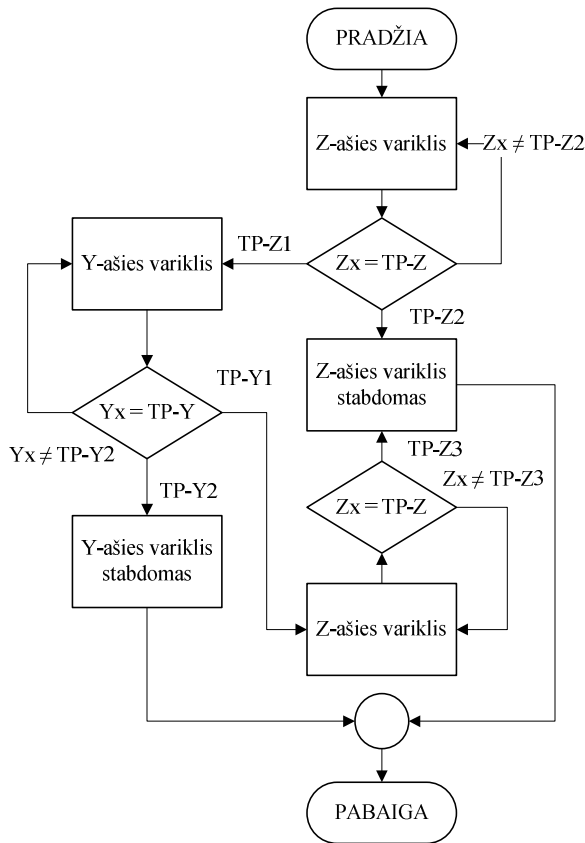
3.17 paveiksle, trapezinio greičio profilio atveju, yra keturios pagrindinės būsenos. Stabdymo būsena yra laikoma kaip pradinė. Kai valdymo sistema gauna pradžios komandą, pereinama į greitėjimo būseną, kurioje pagreitis yra teigiamas. Pasiėkus didžiausią greitį, sistema pereina į pastovaus greičio važiavimo būseną, kai pagreitis lygus nuliui. Kai pasiekama nustatyta koordinatė, įvertinus lėtėjimo kelią, aktyvuojama lėtėjimo būsena – pagreitis yra neigiamas. Galiausiai, kai vėžimėlis pasiekia užduotą koordinatę ir greitis lygus nuliui sistema grįžta į stovėjimo būseną.

Priešingai nei trapezinio greičio profilio atveju, S-formos profilis turi 8 pagrindines būsenas (3.18 paveikslas), kuriame stovėjimo ir važiavimo fazės yra tokios kaip ir trapezinio profilio atveju. Kitos fazės yra grindžiamos Jerk'o valdymu. Priklausomai nuo esamos fazės Jerk'as gali būti teigiamas, neigiamas arba lygus nuliui. Dėl papildomų fazių gaunamas kintantis pagreitis, kuris formuoja S-formos greičio profilį.



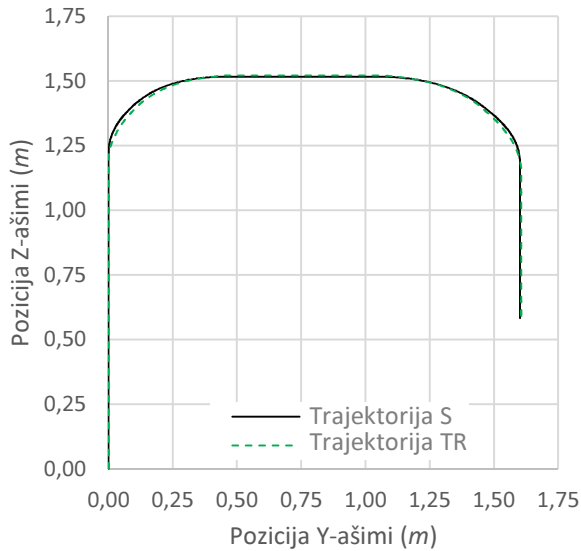
3.18 pav. S-formos greičio kitimo profilio būsenų diagrama
Fig. 3.18. State machine diagram for S-shaped velocity profile

Eksperimentuose naudotas krovinio transportavimo algoritmas pateikiamas 3.19 paveiksle. Norint tiksliau nustatyti PID valdikliui naudojamo profilio efektyvumą eksperimentuose parinkti vienodi parametrai. Šiuo atveju transportavimo procesas yra imituojamas užduodant norimą nuvažiuoti atstumą. Valdymo sistemą aktyvavus, procesas prasideda nuo Z ašies judesio. Ties užduota pozicija TP-Z1, Y ašies variklis įjungiamas ir dirba tol, kol pasiekiamą TP-Y2. Z variklis yra sustabdomas ties TP-Z2 (konteineris pasiekė aukščiausią tašką). Kada konteineris pasiekia TP-Y1 poziciją, Z ašies variklis yra aktyvuojamas, tačiau nustatoma priešinga kryptis (konteinerio nuleidimui). Kai konteineris pasiekia užduotą tašką, algoritmas sustabdo sistemą. Tuo transportavimo procesas pasibaigia.



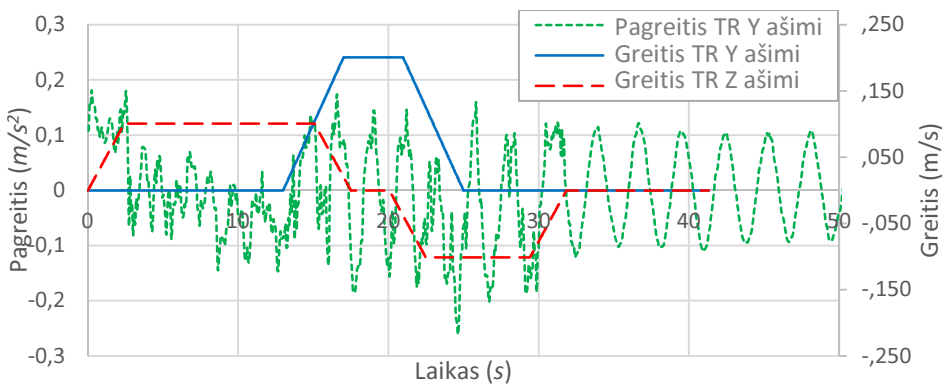
3.19 pav. Laboratorinio krantinės kranų valdymo sistemos algoritmas, naudotas eksperimento metu su trapeciniu ir S-formos greičio profiliu
Fig. 3.19. The algorithm of laboratory scaled quay crane control system, used in experiments with trapezoidal and S-shaped velocity profiles

3.19 paveiksle pavaizduoto algoritmo vykdymo metu, kranų jutiklinis tinklas (šiuo atveju akcelerometras) matuoja vežimėlio ir griebtuvo pagreitį, greitį, truktelėjimus ir atstumą. Taip pat perduoda juos Arduino Mega mikrovaldikliui. Suskaičiuota eksperimento metu užfiksuota judėjimo trajektorija pateikiama 3.20 paveiksle. Grafike pavaizduotos konteinerio judėjimo trajektorijos taikant trapecinį (taškuota kreivė) ir S-formos (vientisa kreivė) greičio profilius. Nustatyta, kad abiem atvejais judėjimo trajektorija 1–2 procentų ribose sutampa. Tai reiškia, kad transportavimo procesai buvo panašūs, todėl galima lyginti šių profilių charakteristikas ir įtaką konteinerio svyravimams.



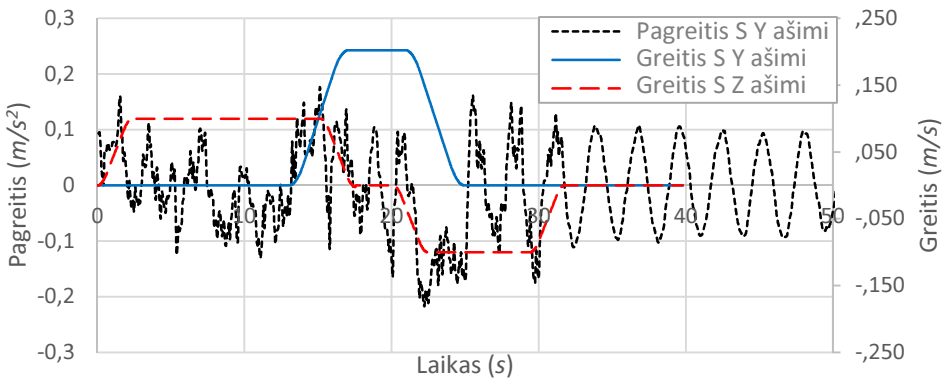
3.20 pav. Konteinerio judėjimo trajektorija eksperimento metu
Fig. 3.20. Container transportation trajectory during experiments

Atliekant eksperimentą konteineris buvo pakeltas į 1,52 metro aukštį (Z ašimi) horizontaliosios atskaitos plokštumos atžvilgiu (ši plokštuma laikoma eksperimentinio stendo patalpoje esančios grindys), ir transportuojamas Y ašimi 1,61 metro atstumu ir galiausiai nuleistas žemyn iki 0,58 metro (Z ašimi). Šis transportavimo atvejis buvo taikomas abiem greičio profiliams.



3.21 pav. Trapezinio greičio kitimo profilio eksperimentiniai rezultatai
Fig. 3.21. Experimental results using trapezoidal velocity profile

Trapecinio greičio profilio rezultatai pavaizduoti 3.21 paveiksle, kuriame pateikta krovinio greičio svyravimų Y ašimi dinaminė reakcija krovinio transportavimo metu. Žalia (taškuota) linija pažymėti svyravimų Y ašimi rezultatai, kai taikomas trapecinis greičio profilis (TR), raudona (brūkšninė) linija pažymėta krovinio Z ašies greitis, mėlyna (ištininė) linija žymi vežimėlio greitį Y ašimi. Rezultatai taikant S-formos greičio profilį pateikiami 3.22 paveiksle, kuriame juoda (taškuota) linija pažymėti konteinerio greičio svyravimai taikant S-formos greičio profilį vežimėlio judėjimui Y ašimi.



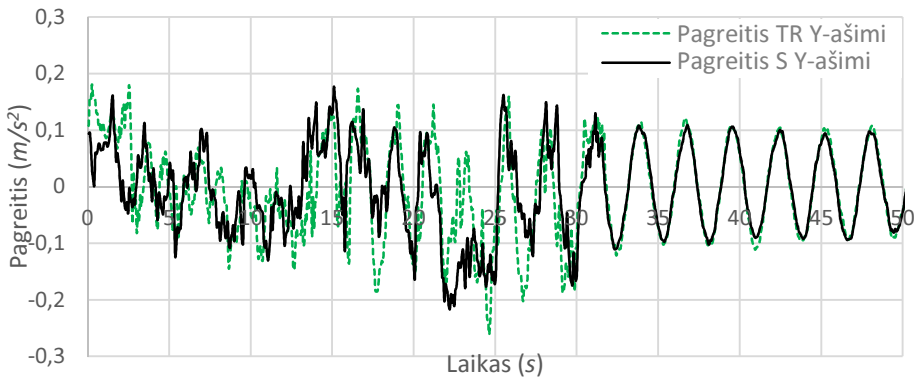
3.22 pav. S-formos greičio kitimo profilio eksperimentiniai rezultatai

Fig. 3.22. Experimental results using S-shaped velocity profile

Eksperimentiškai imituojant krovą ir vykdant transportavimo procesą pirmiausia buvo pradėdamas judėjimas Z ašimi. Abiem tyrinėjtais greičio profilio atvejais greitėjimas truko 2 sekundes. Dėl įsibėgėjimo procedūros ir veiksmų Z ašimi, kaip pateikiama abiejuose paveiksluose (3.21 paveiksle ir 3.22 paveiksle), konteinerio svyravimų greitis Y šimi turi piką, tačiau tai nėra pagrindinė priežastis, kuri sukelia išliekamuosius svyravimus. Tuo momentu, kai pradėdamas judėjimas Y ašies kryptimi (apie 15 transportavimo sekundę) aktyvuojama greitėjimo fazė (Fazė I). Būtent šiuo momentu konteinerio svyravimo greitis staiga padidėja ir šių svyravimų pagreičio amplitudė pasiekia $0,18 \text{ m/s}^2$. Trapecinio greičio profilio taikymo atveju Y ašies judėjimo aktyvavimas daro įtaką išliekamiesiems ilgą laiką trunkantiems greičio svyravimas, kurie išlieka ir po transportavimo proceso pabaigos. Lyginant su S-formos greičio profilio rezultatais, kai ties III transportavimo faze (3.15 paveikslas) konteinerio svyravimo greitis (3.22 paveikslas) yra šiek tiek slopinamas, tačiau vykdant VII transportavimo fazę, jie vėl sužadunami.

Lyginant konteinerio svyravimų greičio priklausomybę nuo greičio profilio abiem atvejais Y ašimi (3.23 paveikslas), išliekamasis svyravimų greitis pasibaigus transportavimo procesui yra vienodas. Nors atskirais atvejais, skirtingose sistemose S-profilio taikymas parodo pastebimai geresnius krovinio svyravimų slopinimo rezultatus, dėl sudėtingos krano sistemos, kurioje krovinys yra pakabintas ant lynų, gaunami rezultatai nesuteikia siekiamo svyravimų slopinimo rezultato.

Mokslininkai Keun-Ho Rew (Rew *et al.*, 2009) pritaikė S-formos greičio profilį roboto manipuliatoriui, kai valdoma standžia jungtimi pritvirtinta strėlė. Šiame darbe nagrinėjamu atveju S-formos greičio profilis pritaikytas krantinės krano griebtuvui siekiant valdyti krovinio svyravimus, kai griebtuvas sujungtas su vežimėliu lanksčia jungtimi. Kaip ir Keun-Ho Rew (Rew *et al.*, 2009) atveju vežimėlio tolygesnis judėjimas buvo realizuotas, tačiau išliekamieji svyravimai tiesiogiai nevaldomame griebtuve išliko ir yra panašūs abiem atvejais.



3.23 pav. Krovinio svyravimų pagreičio palyginimas trapezoidinio ir S-formos greičio kitimo profilių atvejais

Fig. 3.23. Cargo oscillation comparison using trapezoidal and S-shaped velocity profile

Atsižvelgiant į kitų mokslininkų rezultatus aprašytus pirmame skyriuje, galima teigti, kad tokios sudėtingos valdymo sistemos reikalauja kombinuotų valdymo technologijų. Todėl S-formos profilio taikymas, kaip vieno valdymo sistemos elemento, neduoda norimo rezultato. Tačiau atsižvelgiant į eksperimento metu gautus rezultatus šis profilis panaudotas PID valdiklio įėjimo formavimui. Remiantis kitų mokslininkų tyrimų rezultatais šis sprendimas teoriškai turėtų pagerinti gaunamus rezultatus.

3.2.3. Krano valdymo sistemos projektavimas Simulink aplinkoje taikant jėgimo profilį valdiklio parametų derinimui

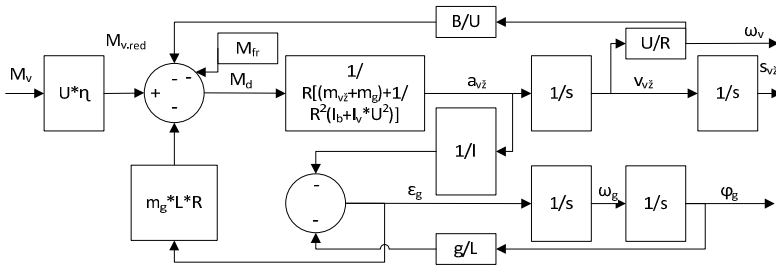
Ankstesniuose skyriuose buvo atlikti mechaninės krano posistemės skaičiavimai. Taip pat sudarytas išsamus matematinis modelis, kurio pagrindu suprojektuota krano kėlimo mechanizmo ir griebtuvo valdymo sistema Matlab Simulink aplinkoje. Simulink modelis kaip ir 2 skyriuje aprašytas matematinis modelis, atitinka laboratorinio prototipo fizinius parametrus. Atsižvelgiant į matematinius skaičiavimus (2.2.1 poskyryje) buvo sudaryta diferencialinių lygčių sistema skirta Matlab Simulink blokinio modelio struktūrai:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{d\phi_g}{dt} = \omega_g, \frac{ds_{v\check{z}}}{dt} = v_{v\check{z}}, \\ \left(m_g + m_{v\check{z}} \right) \frac{dv_{v\check{z}}}{dt} + \\ + m_g L \frac{d\omega_g}{dt} + \\ + \frac{1}{R^2} \left(I_b + I_v U^2 \right) \frac{dv_{v\check{z}}}{dt} \end{array} \right] \cdot R + M_{fr} = M_v U \eta, \quad (3.7)$$

$$m_g L \frac{dv_{v\check{z}}}{dt} + m_g L^2 \frac{d\omega_g}{dt} + m_g L g \phi_g = 0.$$

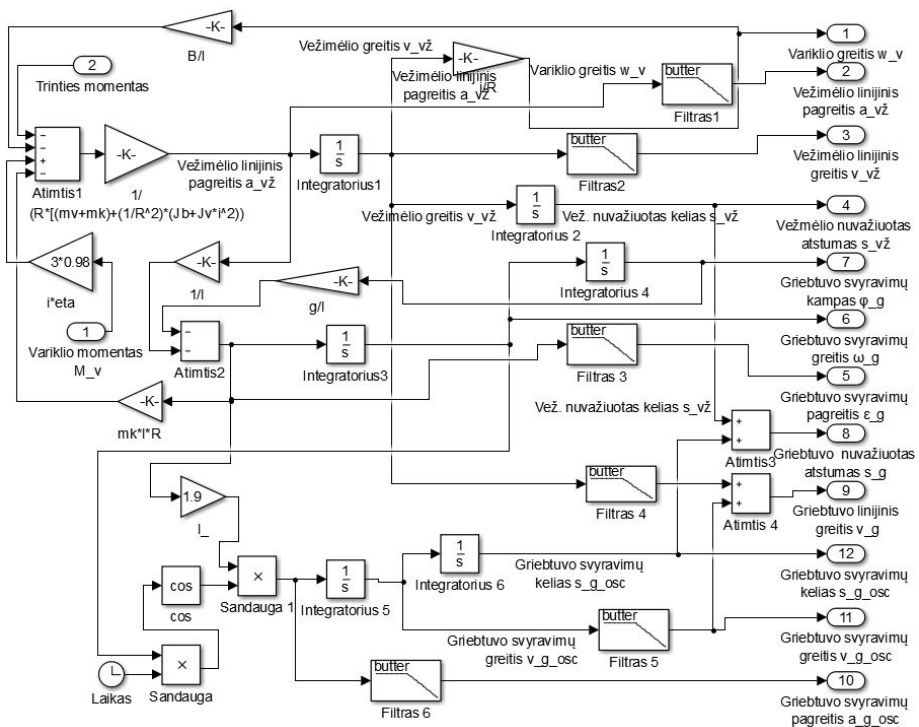
Čia, η – mechaninės perdavos naudingumo koeficientas, ϕ_g – griebtuvo svyravimų kampas, ω_g – griebtuvo kampinis svyravimų greitis, $s_{v\check{z}}$ – vežimėlio poslinkis, $v_{v\check{z}}$ – vežimėlio greitis, m_g – griebtuvo su kroviniu masė, $m_{v\check{z}}$ – vežimėlio masė, L – linų ilgis, R – būgno spindulys, I_b – būgno inercijos momentas, I_v – elektros variklio inercijos momentas, U – reduktoriaus perdavos koeficientas, M_{fr} – trinties momentas, M_v – variklio momentas, indeksai: $v\check{z}$ – vežimėlis; g – griebtuvas; s – skriemulys; v – variklis.

Remiantis diferencialinių lygčių sistema sudaryta krano kėlimo mechanizmo pavaros mechaninės posistemės blokinė struktūrinė schema (3.24 paveikslas). Pasinaudojant pateikta blokine struktūrine schema galima nustatyti vežimėlio linijinį pagreitį, greitį, poslinkį bei krovinio sukamojo judėjimo aplink tvirtinimo tašką svyravimų pagreitį, greitį ir svyravimų kampą. Taip pat blokiniėje diagramoje yra parodoma trinties apkrova, variklio, būgno, krovinio ir vežimėlio dinaminės charakteristikos – inercijos momentai, masės. Sudaryta blokinė schema struktūriškai perkelta į Simulink aplinką, realizuojant sukurtos struktūros blokus naudojantis programinio paketo funkcijų biblioteka.



3.24 pav. Kėlimo mechanizmo mechaninės posistemės blokinė schema
 Fig. 3.24. Block diagram of lifting mechanism mechanical subsystem

Sudarytas posistemės modelis Simulink aplinkoje pateikiamas 3.26 paveiksle, o jo vidinė blokinė struktūra pateikiama 3.25 paveiksle.



3.25 pav. Krano vežimėlio ir kėlimo mechanizmo mechaninės posistemės bloko vidinė struktūra

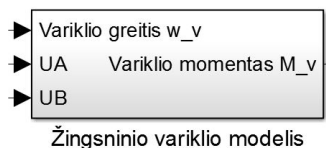
Fig. 3.25. Quay crane trolley and lifting mechanism mechanical subsystem internal block structure

Papildomai pateiktame Matlab Simulink mechaninės posistemės vidinės struktūros modelyje panaudoti žemo dažnio filtrai. Siekiama išskirti kinematinių parametrų (tokių kaip vežimėlio greitis, pagreitis ir kiti) vertes, skirtas valdymo sistemai (su įvestu globaliu laiku clock3), kadangi realiose sistemose šią filtravimo funkciją atlieka mechaninių grandžių tarpusavio trintis. Taip pat papildomai šiame modelyje yra sudaryta skaičiavimo struktūra, skirta skaičiuoti krovinio linijiniams kinematiniais parametrams – krovinio linijiniams svyravimo pagreičiui, greičiui ir poslinkiui.



3.26 pav. Vežimėlio ir kėlimo mechanizmo mechaninės posistemės blokas
Fig. 3.26. Block of trolley and lifting mechanism mechanical subsystem

Krano kėlimo mechanizmo ir vežimėlio mechaninės posistemės (3.25 paveiksle) bloką sudaro du įėjimai, dvylika išėjimų skirtų sistemos stebėjimui. Išėjimai apibūdina vežimėlio ir krovinio kinematinės savybes. Įėjimai skirti trinties jėgos apkrovos momento ir variklio momento įvesčiai. Sudarant matematinį modelį pagal laboratorinio fizinio modelio technines charakteristikas buvo sumodeliuotas Matlab Simulink žingsninio variklio blokas (modelis), kuris pateiktas 3.27 paveiksle

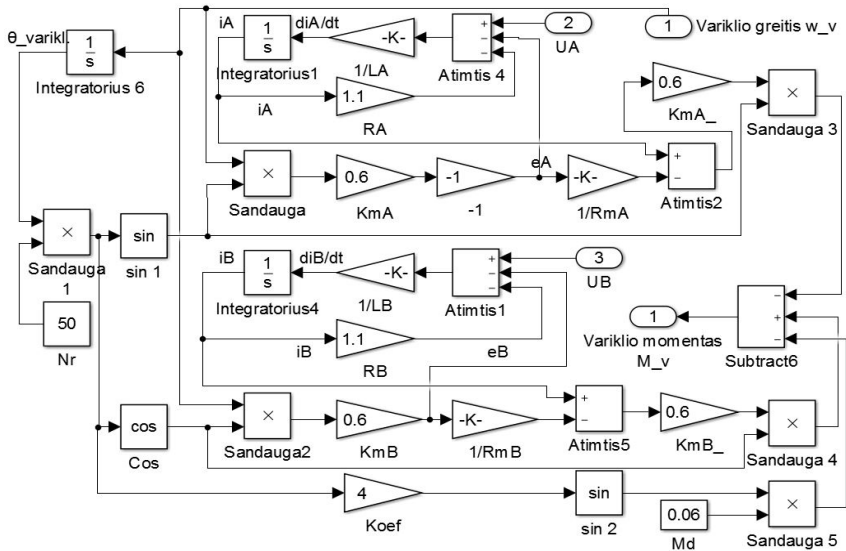


3.27 pav. Žingsninio variklio mechaninės posistemės blokas
Fig. 3.27. Stepper motor mechanical subsystem block

Laboratoriniame sumažinto mastelio krantinės kranio prototipe ir jo matematiname modelyje (2.3 skyrius) naudojami mažos galios asinchroniniai varikliai. Tačiau kuriant valdymo sistemą naujam griebtuvui ir kėlimo mechanizmo laboratoriniam prototipui, panaudoti žingsniniai varikliai. Jų panaudojimas įtakotas turimos materialinės bazės. Žingsninio variklio modelį sudaro trys įėjimai ir vienas išėjimas, skirtas variklio momento skaičiavimo rezultatų pateikimui tolimesniems skaičiavimams. Šio žingsninio variklio pagrindinė modelio matematinė išraiška pateikiama žemiau:

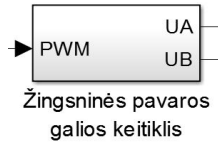
$$M_{motor} = -K_m \left(i_A - \frac{e_A}{R_m} \right) \sin(N_r \theta) + K_m \left(i_B - \frac{e_B}{R_m} \right) \cos(N_r \theta) - M_d \sin(4N_r \theta), \quad (3.8)$$

čia K_m – žingsninio variklio momento konstanta, i_A ir i_B – žingsninio variklio apvijų srovės, e_A ir e_B – žingsninio variklio apvijų sukuriamos vidinės įtampos, R_m – įmagnetinimo varža, N_r – žingsninio variklio dantų skaičius polyje, θ – vieno žingsnio pasisukimo kampas, M_d – vidinis variklio stabdymo momentas. Šio žingsnio variklio vidinė blokinė struktūra pateikiama 3.28 paveiksle.



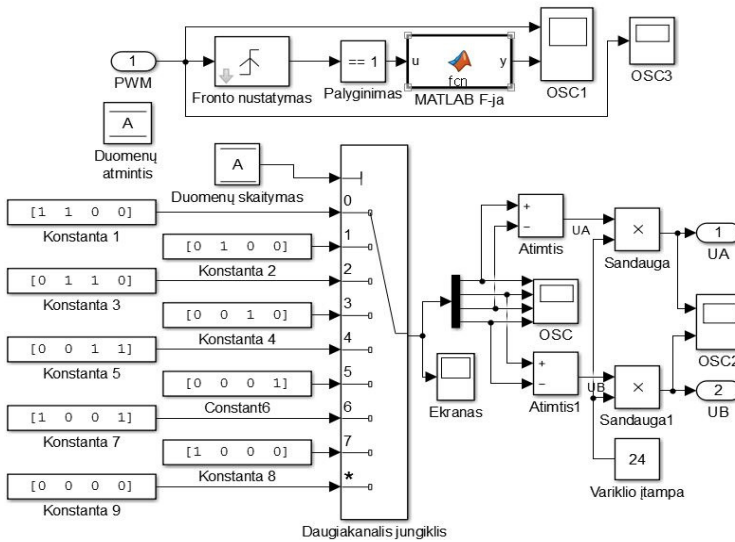
3.28 pav. Žingsninio variklio mechaninės posistemės vidinė struktūra
Fig. 3.28. Stepper motor mechanical subsystem internal structure

Šioje posistemės bloko vidinėje struktūroje yra skaičiuojamos žingsninio variklio srovės, įvertinta variklio sukuriamų vidinių įtampų įtaka bei variklio vidinis pasipriešinimo momentas. Žingsninio variklio blokinio modelio jėgimo parametrai yra siunčiami iš valdomo galios keitiklio išėjimų pavaizduotų 3.29 paveiksle.



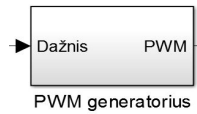
3.29 pav. Valdomo galios keitiklio posistemės blokas
Fig. 3.39. Controllable power inverter subsystem block

Šio keitiklio modelio išėjimo signalai yra variklio apvijų maitinimo įtampos UA ir UB. Jo posistemės bloko vidinė struktūra pateikiama 3.30 paveiksle.



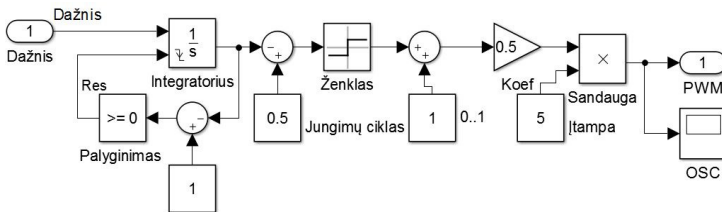
3.30 pav. Valdomo galios keitiklio posistemės bloko vidinė struktūra
Fig. 3.30. Controllable power inverter subsystem internal block structure

Valdomo galios keitiklio posistemės bloko jėgime paduodamas IPM signalas iš IPM generatoriaus bloko, o pats blokas generuoja signalą, skirtą žingsniniam varikliui, kad jis dirbtų pusinio žingsnio režimu, taip didinant pozicionavimo tikslumą.



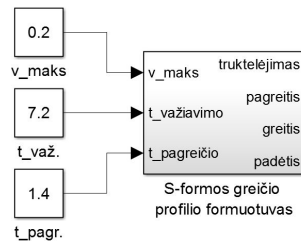
3.31 pav. Impulso trukmės moduliacijos generatoriaus blokas
Fig. 3.31. Generator block of pulse width modulation

IPM generatoriaus blokas pavaizduotas 3.31 paveiksle, o jo vidinė struktūra 3.32 paveiksle.



3.32 pav. Impulso trukmės moduliacijos generatoriaus bloko vidinė struktūra
Fig. 3.32. Pulse width modulation generator block internal structure

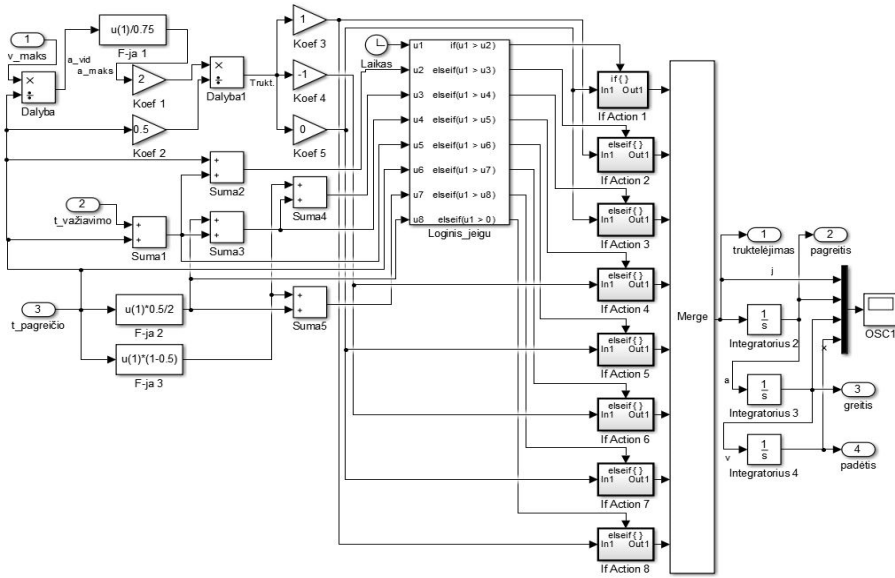
Šio Simulink bloko paskirtis yra realizuoti matematinių modelių Arduino vidinę funkciją, kuri iš dažnio, kuris yra proporcingas krano vežimėlio su kroviniu judėjimo linijiniam greičiui Y ašimi, pakeisti į IPM signalą, skirtą galios keitiklio bloko (pateikiama 3.30 paveiksle) įėjimui. Šis dažnio keitimas yra realizuotas struktūriškai.



3.33 pav. S-formos greičio kitimo profilio formavimo blokas
Fig. 3.33. S-shape velocity profiling block

Simulink matematiniam modelyje taip pat yra dar du papildomi blokai – vienas skirtas greičio signalo pakeitimui į užduodamą dažnį, kuris paduodamas į IPM generatoriaus įėjimą (3.31 paveiksle), o kitas blokas yra skirtas S-formos greičio

kitimo profilio užduodančiojo greičio signalo formavimo blokas (3.33 paveikslas), kurio vidinė struktūra pateikiama 3.34 paveiksle.



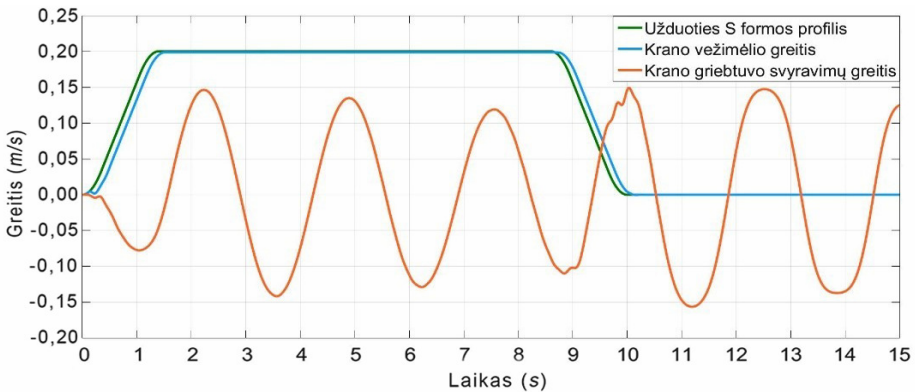
3.34 pav. S-formos greičio kitimo profilio formavimo bloko vidinė struktūra

Fig. 3.34. S-shape velocity profiling block internal structure

Simulink modelis išbandytas, paduodant S-formos įėjimo profilį, kai kranio vežimėlio valdymo sistema yra atvirojo tipo (be grįžtamojo ryšio), o kranio vežimėlis su kroviniu, kai lynų ilgis 1,9 metro, važiuoja 0,2 m/s greičiu. Gautasis grafikas pateiktas 3.35 paveiksle – čia S-formos profilio signalas – žalia spalva, kranio vežimėlio greitis – mėlyna linija, o krovinio svyravimų linijinis greitis krovinio pakabinimo taško atžvilgiu – raudona spalva. Kaip matyti (3.35 paveikslas), be valdymo vežimėlis vėluoja reaguoti į užduoties signalą dinamiame režime ir turi dinaminę paklaidą, o dėl nesančio PID valdiklio ir grįžtamojo ryšio yra ir statinė paklaida, kuri šiuo atveju yra lygi – 1,3 % ir neturi didelės įtakos sistemos veikimui. Krovinio svyravimų greitis siekia beveik 0,15 m/s ir slopsta – svyravimų amplitudės procentinis sumažėjimas per periodą 7,7 %, o dažnis – 0,374 Hz. Šie eksperimentai, tai atskaitos taškas siekiant nustatyti PID valdiklio parametrus.

Šis matematinis Simulink modelis buvo sudarytas siekiant nustatyti PID valdiklio parametrus, su kuriais vežimėlio judėjimo metu užtikrinami minimalūs krovinio svyravimai. Daugelis literatūroje (1 skyrius) apžvelgtų mokslinių darbų ir

juose taikomų PID valdiklio derinimo metodų, atsižvelgiant į sistemos sudėtingumą ir kabantį krovinį, kurio svyravimus siekiama minimizuoti, neduoda norimo rezultato, todėl nuspręsta valdiklį derinti empiriniu būdu – eksperimentiškai nustatant valdiklio koeficientus, su kuriais, griebtuvo ir juo transportuojamo krovinio, išliekamieji svyravimai yra minimalūs.



3.35 pav. S-formos greičio kitimo profilio (žalias), vežimėlio greičio (mėlyna) ir krovinio greičio svyravimų (raudona) grafikai

Fig. 3.35. S-shape velocity profile (green), trolley velocity (blue) and spreader oscillation velocity (red) graphs

Šio valdiklio parametrų derinimas fiziniame laboratoriniame prototipe yra sudėtingas dėl techninių apribojimų ir galimų gedimų parinkus netinkamus parametrus. Todėl nuspręsta PID valdiklio parametrus nustatyti panaudojant Matlab Simulink matematinį modelį eksperimentiniu empiriniu metodu minimizuojant, kurio rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje. Minimizavimas atliekamas pasinaudojant kvadratinį paklaidos integraliniu kriterijumi. Pirmas modeliavimo eksperimentas buvo atliekamas be grįžtamųjų ryšių (kranų vežimėlio greičio ir krovinio svyravimų linijinio greičio).

Pradiniu priartėjimu nustatinėjami PID valdiklio parametrai, kai sistemoje egzistuoja tik kranų vežimėlio linijinio greičio grįžtamasis ryšys (3.41 pav.). 3.2 lentelėje, antrojo modeliavimo bandymo metu nustatytas mažiausias kvadratinis paklaidos nuokrypis, tačiau, tai paaiškinama tuo, kad vežimėlis dėl mažo stiprinimo nepasiekia nustatyto greičio (0,2 m/s) ir dėl tos priežasties didinat proporcinės dalies K_p koeficientą šis nuokrypis mažėja. Todėl kitai paieškai pasirinkta $K_p=0,25$ vertė ir bus nustatoma PID valdiklio integruojančia koeficiento dedamąją. Šiame etape derinama, kad būtų kuo mažesnė vežimėlio judėjimo paklaida, nes didinant integruojančios dedamosios koeficientą, didėja sistemos reakcijos greitis, todėl ir krovinio svyravimai yra didesni.

3.2 lentelė. Proporcinio, integruojančio, diferencijuojančio valdiklio parametrų verčių parinkimo lentelė

Table 3.2. The table of proportional, integral, differential controller values calculations

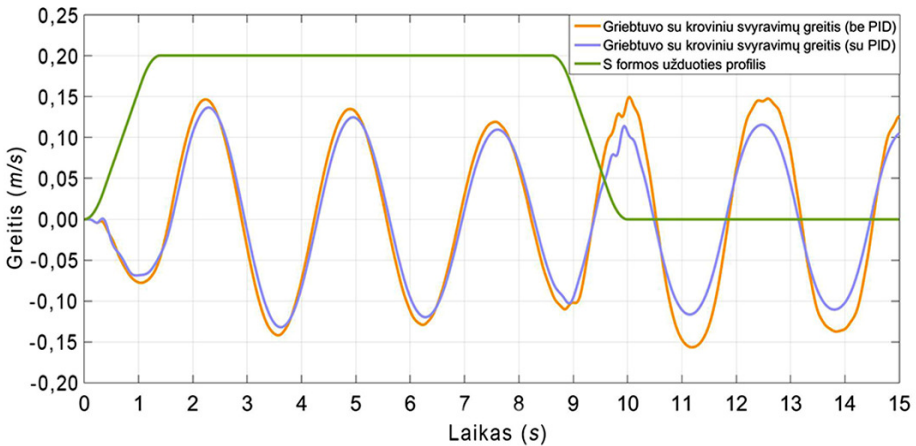
Nr.	K_p	T_i	T_d	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_v^2 dt, rad^2 s$	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_g^2 dt, rad^2 s$
S-formos greičio profilis, be grįžtamojo ryšio					
1	-	-	-	0,0005104	0,06045
S-formos greičio profilis su PID valdikliu ir grįžtamoju ryšiu					
2	0,25	0	0	0,1057	0,003571
3	0,5	0	0	0,07355	0,009511
4	0,75	0	0	0,05411	0,0168
5	1	0	0	0,04149	0,0229
6	1,25	0	0	NESTABILI	
8	0,25	1	0	0,01304	0,01188
9	0,25	2	0	0,005395	0,03046
10	0,25	3	0	0,002996	0,04363
11	0,25	5	0	0,001304	0,0568
12	0,25	10	0	0,0003723	0,06336
13	0,25	15	0	0,005045	0,08118
14	0,25	13	0	0,0002453	0,06383
15	0,3	13	0	0,0002384	0,06375
16	0,4	13	0	0,000229	0,06341
17	0,5	13	0	0,0002234	0,06308
18	0,6	13	0	0,0002219	0,06282
19	0,7	13	0	0,0002478	0,0629
20	0,6	13	0,001	0,0002198	0,06285
21	0,6	13	0,002	0,0002185	0,06284
22	0,6	13	0,004	0,000217	0,06278
23	0,6	13	0,006	0,0002163	0,06275
24	0,6	13	0,008	0,0002158	0,06271

3.2 lentelės pabaiga

Nr.	K_p	T_i	T_d	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_{vž}^2 dt, rad^2 s$	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_g^2 dt, rad^2 s$
23	0,6	13	0,006	0,0002163	0,06275
24	0,6	13	0,008	0,0002158	0,06271
25	0,6	13	0,01	0,0002155	0,06237
26	0,6	13	0,012	0,0002154	0,06265
27	0,6	13	0,015	0,0002154	0,06265

Lentelėje K_p – proporcinės dalies, T_i – integralinės dalies, T_d – diferencialinės dalies koeficientai. Mažiausias kvadratinis paklaidos nuokrypis skaičiuojamas atskirai vėžimėliui (vž) ir griebtuvui (g).

Pagal modeliavimo rezultatus esant tik vienam grįžtamajam ryšiui, kaip minėta anksčiau, gauti tokie PID valdiklio parametrai (pagal 3.2 lentelės 25 bandymą) – $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$. Taikant šiuos parametrus gautas krano vėžimėlio ir krovinio svyravimų greičių pereinamasis procesas, kuris pavaizduotas 3.36 paveiksle.



3.36 pav. S-formos greičio kitimo profilio (žalias), vėžimėlio greičio (mėlyna) ir krovinio greičio svyravimų (raudona) grafikai, su PID valdikliu ir vienu grįžtamoju ryšiu

Fig. 3.36. S-shape velocity profile (green), trolley velocity (blue) and spreader oscillation velocity (red) graphs with PID controller and one feedback

Toliau derinamas kompensavimo grandies PI valdiklis, skirtas krovinių svyravimų slopinimui. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje. Pagal rezultatus, nustatyta, kad krovinių svyravimų intensyvumo mažinimui papildoma PI sistema tik su proporcinguoju reguliatoriumi turi didesnę paklaidą (3.3 lentelė, 8–11 rezultatai), nes kvadratinio nuokrypio integralinis rodiklis didėja didinant PI dalies K_p koeficientą.

3.3 lentelė. Proporcinio, integruojančio, diferencijuojančio ir proporcinio, integruojančio valdiklių parametrų verčių parinkimo lentelė

Table 3.3. The table of proportional, integral, differential and proportional, integral controllers values calculations

Nr.	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_{vz}^2 dt, rad^2 s$	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_g^2 dt, rad^2 s$
-	PID			PI		-	-
1	0,6	13	0,01	0	0	0,0002155	0,06237
2	0,6	13	0,01	0,1	0	0,0002468	0,06568
3	0,6	13	0,01	0,2	0	0,0003128	0,06883
4	0,6	13	0,01	0,1	1	0,0008445	0,03695
5	0,6	13	0,01	0,1	2	0,002096	0,01187
6	0,6	13	0,01	0,1	3	0,002881	0,01541
7	0,6	13	0,01	0,2	2	0,002071	0,01107
8	0,6	13	0,01	0,3	2	0,002079	0,01065
9	0,6	13	0,01	0,4	2	0,002143	0,01045
10	0,6	13	0,01	0,5	2	0,00223	0,01033
11	0,6	13	0,01	0,6	2	0,002359	0,01062

Pagal 3.3 lentelės duomenis ir modeliavimo rezultatus buvo pasirinkti tokie PID ir PI koeficientai – PID: $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$, o papildomo PI valdiklio: $K_p = 0,2$, $K_i = 2$. Pasirinktas 7 bandymas, todėl, kad vežimėlio integralinis kvadratinis nuokrypis yra mažiausias PID ir PI valdymo sistemoje, o krovinių svyravimų kvadratinis integralinis nuokrypis nuo šios vertės kinta kas 3 procentus. Šie gauti valdiklių parametrai yra pradiniai PID ir PI valdiklio duomenys eksperimentiniam empiriniam šių valdiklių parametrų nustatymui, kuris aprašytas 3.3 skyriuje.

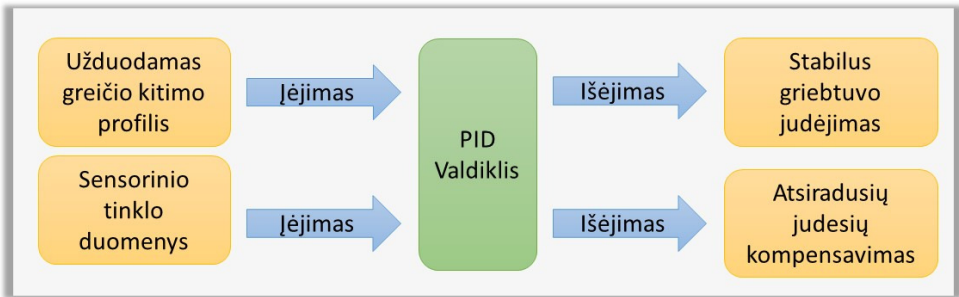
3.3. Valdymo sistemos efektyvumo tyrimai krovos procese

Svarbiausia, krantinės kranų valdymo sistemos, yra saugumas ir efektyvumas, kurie tiesiogiai priklausomo nuo krovinio judėjimo. Išoriniai veiksniai – vėjas, operatoriaus ar automatinis valdymas gali ženkliai paveikti konteinerio judėjimą. Sužadinti konteinerio svyravimai apsunkina krovos procesą, o tai turi įtakos bendrai krovos trukmei. Nestabilus ant lynų kabantis krovinyas gali kliudyti aplinkinius objektus ar sužeisti teritorijoje esančius darbuotojus, todėl be didėjančių laiko sąnaudų mažėja ir transportavimo saugumas. Krantinės kranai ir jais gabenamo krovinio svyravimai kaip problemine sritis nagrinėjami šiose uždaviniuose: judesio sukkelto svyravimo slopinimas, trikdžių sukeliančių svyravimą šalinimas, pozicionavimo galimybių didinimas, krovinio svyravimų aptikimas, operatoriaus valdymo pulto programinės sąsajos projektavimas. (Sorensen, Fisch, Dickerson, Singhose, & Glauser, 2008). Visos šios problemos sprendžiamos, siekiant sukurti standartizuotą kranų manipuliavimo (valdymo) sistemą, padėsiančią atlikti preciziškesnius valdymo veiksmus operatoriui bei mažinančią atsirandančius svyravimus ir didinančią transportavimo saugumą.

Šiame skyriuje pateikiamas valdymo algoritmas, sukurtas atsižvelgiant į pirmajame skyriuje atliktą literatūros šaltinių apžvalgą, bei įvertinant geriausius šiuo metu siūlomus valdymo sprendimus, turinčius praktinį pritaikomumą konteinerių terminaluose esantiems krantinės kranams. Aprašoma suprojektuota valdymo sistema su svyravimų kompensavimo grandimi bei pateikiami sistemos veikimo rezultatai, gauti atliekant eksperimentinius tyrimus laboratoriniame krantinės kranų prototipe. Sukurtos valdymo sistemos algoritmo efektyvumo įvertinimui rezultatai palyginti su moderniaisiais, šiai dienai labiausiai cituojamais ir turinčiais praktinį pritaikomumą, kitų mokslininkų gautais rezultatais testuojant valdymo algoritmus skirtus svyravimų mažinimui ar jų kompensavimui.

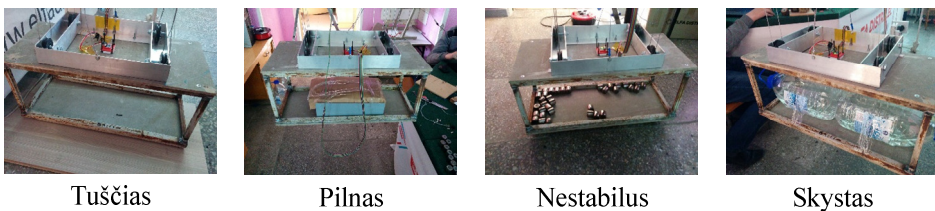
3.3.1. Krantinės kranų valdymo sistema su svyravimų kompensavimo grandimi

Ankstesniame poskyryje aprašytas krantinės kranų prototipas ir jo techninė valdymo sistema panaudoti kaip įrankis, kuriuo realizuotas suprojektuotas valdymo algoritmas. Šio algoritmo pagrindas išlieka tradicinis daugelio mokslininkų siūlomas valdymas taikant PID valdiklį, jį kombinuojant su įvairiomis valdymo technologijomis (Ahmad, Saealal, Zawawi, & Raja Ismail, 2011; Elbadawy & Shehata, 2015; Jaafar, Mohamed, Jamian, *et al.*, 2013; Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013; Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013; Majid *et al.*, 2013). Sukurto valdymo algoritmo supaprastintas koncepcinis modelis pateikiamas 3.37 paveiksle.



3.37 pav. Supaprastinta valdymo algoritmo koncepcija
Fig. 3.37. The simplified concept of control algorithm

Šios koncepcijos vienas pagrindinių elementų, taikomų ir kituose mokslininkų valdymo algoritmuose – įėjimo profilis. Priešingai nei kitų mokslininkų darbuose (Ngo *et al.*, 2012), jis užduodamas ne pozicijai, kaip tai daroma Jaafar ir kitų darbuose (Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013; Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013), bet greičiui. Tokiu būdu konteinerio pozicionavimas paliekamas kaip ant-raeilė valdymo užduotis, iškeliant į priekį užsiduotą greičio profilį, kurį valdiklis siekia palaikyti viso transportavimo metu. Kiekvienam skirtingam krovinių tipui eksperimentiniu būdu buvo suprojektuojamas S-formos (aprašytos 3.2 poskyryje) greičio kitimo profiliai, taikant simetrinį profilį, kuriam atitinkamai nuo krovinių tipo, keičiasi fazės trukmė. Šie greičio profiliai taikomi kiekvienam individualiam konteineriui atsižvelgiant į jo parametrus. Skirtingų greičio kitimo profilių taikymo individualiam konteineriui poreikis atskleistas atliekant eksperimentinį tyrimą, kuriame konteineris transportuojamas iš taško A į tašką B, valdymui naudojant tik simetrinį įėjimo profilį su vienodais parametrais. Tyrimo metu naudoti krovinių tipai pateikiami 3.38 paveiksle.

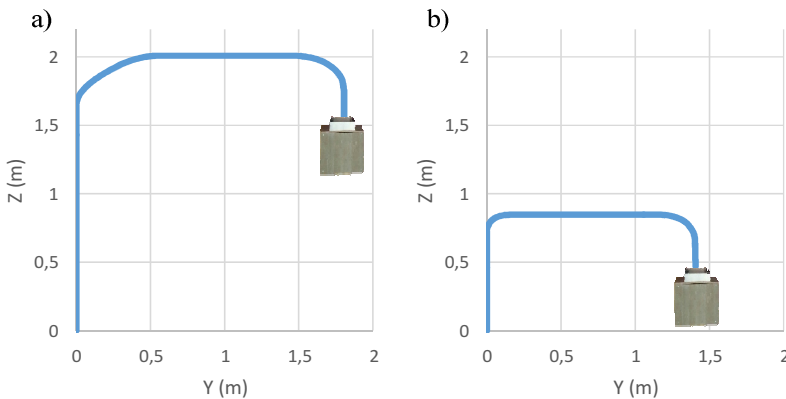


3.38 pav. Eksperimentuose naudojami krovinių tipai
Fig. 3.38. Cargo types used in experiments

Pagrindiniai šių konteinerių parametrai, su kuriais buvo atliekami tolimesni eksperimentiniai tyrimai, yra: tuščias (*angl.* Empty) – 7,45 kg, pilnas (*angl.* Full) –

12,45 kg, skystas (angl. *Liquid*) – 11,70 kg, nestabilus (angl. *Unstable*) – 11,14 kg. Atsižvelgiant į kitų algoritmų eksperimentines sąlygas, tyrimams atlikti naudojami skirtingi konteinerių tipai, siekiant kuo labiau prigretinti eksperimentines sąlygas ir parametrus prie lyginamų mokslininkų darbų.

Individualizuoto greičio kitimo profilio taikymo būtinumui patikrinti transportavimo procesas buvo atliekamas pagal pateiktas suskaidytas judėjimo trajektorijas (3.39 paveikslas).



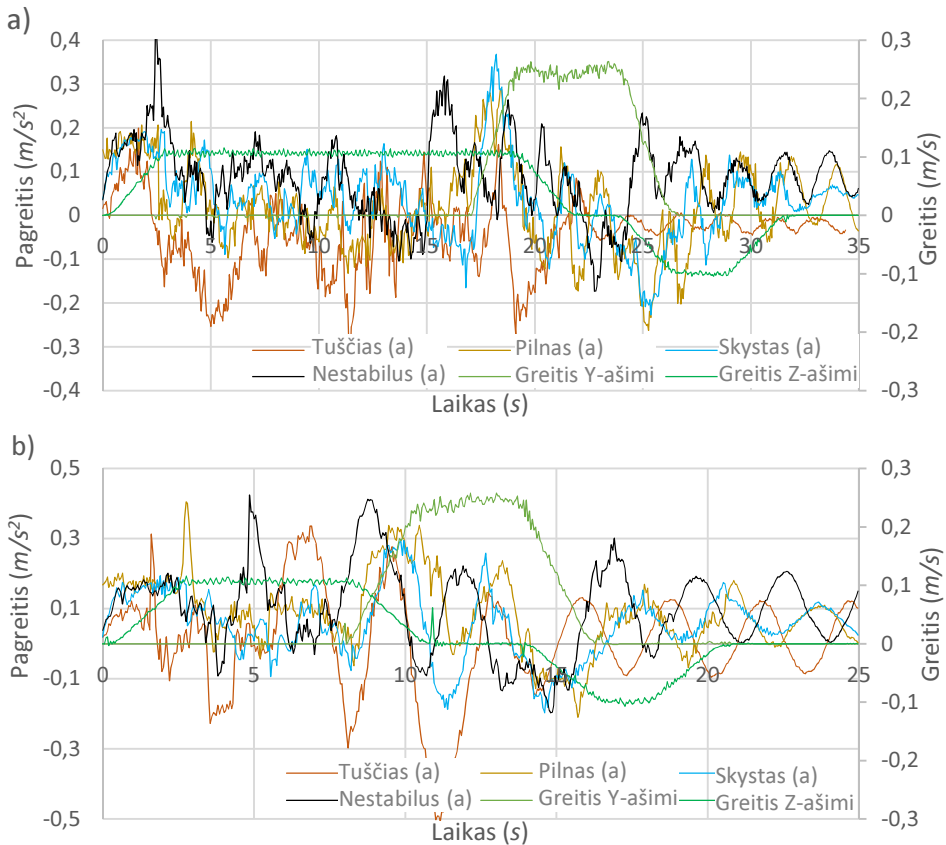
3.39 pav. Eksperimentuose taikomos transportavimo trajektorijos:

a) trumpas lynas; b) ilgas lynas;

Fig. 3.39. Cargo transportations trajectories used in experiments:

a) short rope; b) long rope;

Pirmajame variante konteineris pakeliamas į dviejų metrų aukštį, tačiau, iš tvirtinimo prie vežimėlio perspektyvos, gaunamas trumpas lynas, antruoju atveju krovinyi pakeliamas į 0,8 metro aukštį ir gaunamas ilgas lynas. Šiuo eksperimentu siekiama nustatyti ar yra poreikis abiem atvejais taikyti skirtingus greičio profilius skirtingiems kroviniams. Eksperimento rezultatai pateikiami 3.40 paveiksle. Gauti rezultatai patvirtina kintančio greičio kitimo profilio, pritaikyto individualiam konteineriui, poreikį. Tai atsiskleidžia išliekamuosiuose svyravimuose, kai baigiamas horizontalaus judėjimo procesas (3.40a paveiksle nuo 27 sekundės, 3.40b paveiksle nuo 17 sekundės). Pirmojo varianto atveju matome, kad kiekvienas krovinyi turi skirtingas svyravimo charakteristikas, o stabiliausias pasibaigus transportavimo procesui yra tuščias konteineris. Taigi galima daryti prielaidą, kad atitinkamai suderinus greičio profilį individualiam konteineriui, galima pasiekti analogišką tuščio konteinerio atveju rezultatą, užtikrinant minimalius išliekamuosius svyravimus.



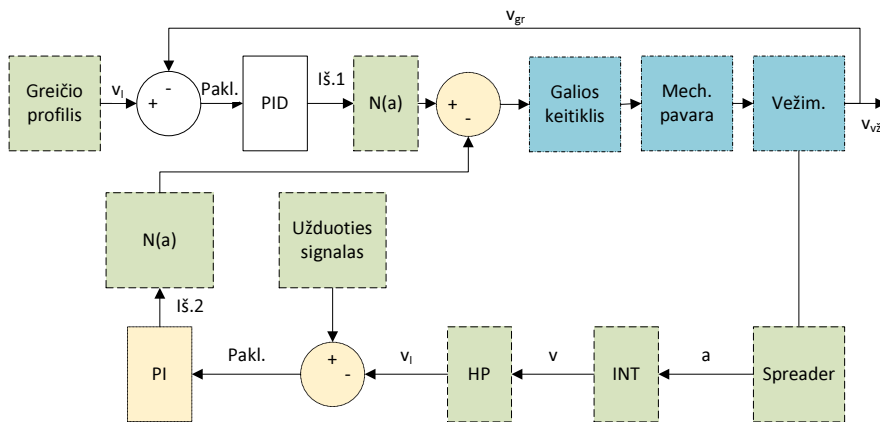
3.40 pav. Vienodų S-formos greičio kitimo profilio parametrų taikymas skirtingo tipo kroviniams esant ilgam ir trumpam lynui

Fig. 3.40. The same S-shaped velocity profile parameters applied to different cargo types for different ropes length a) b)

Kitas supaprastintos valdymo koncepcijos pagrindinis elementas, tai jutiklinis tinklas, kuris naudojamas stebėjimui, ar kaip grįžtamasis ryšys valdymo sistemoje. Taigi greičio kitimo profilis kartu su jutikliniu tinklu valdymo algoritme panaudojami kaip PID valdiklio jėgimo signalai, kurie leidžia sistemoje užtikrinti santykinai stabilų griebtuvo judėjimą. Tačiau vien stabilaus judėjimo nepakanka norint vykdyti pilną perkrovos ciklą „laivas–krantas–laivas“ sudėtingomis krovos sąlygomis. Ekstremaliomis situacijomis, užkliudžius kitą objektą ar veikiant stipriam vėjo gūsiui, atsiranda nenumatytas krovinio svyravimas. Šio pobūdžio svyravimai ir sukelia didžiausius išliekamuosius svyravimus, kurie turi reikšmingą

įtaką bendrai krovos trukmei. Todėl vienas iš uždavinių – stabiliai ir preciziškai atlikti krovinio transportavimą, kompensuojant atsiradusius svyravimus.

Pagal 1 skyriaus siūlomus sprendimus – supaprastinus užduotį buvo modifikuojami jau egzistuojantys valdymo algoritmai. Taip siekiama pagerinti rezultatus perkrovos cikle „laivas–krantas–laivas“. Kadangi nuspręsta užduoties signalu valdyti greitį, atitinkamai keičiasi ir valdymo sprendimai, pritaikomi kranu valdyme. Žemiau pateiktame paveiksle (3.41 paveiksle) pavaizduota valdymo algoritmo blokinė schema.

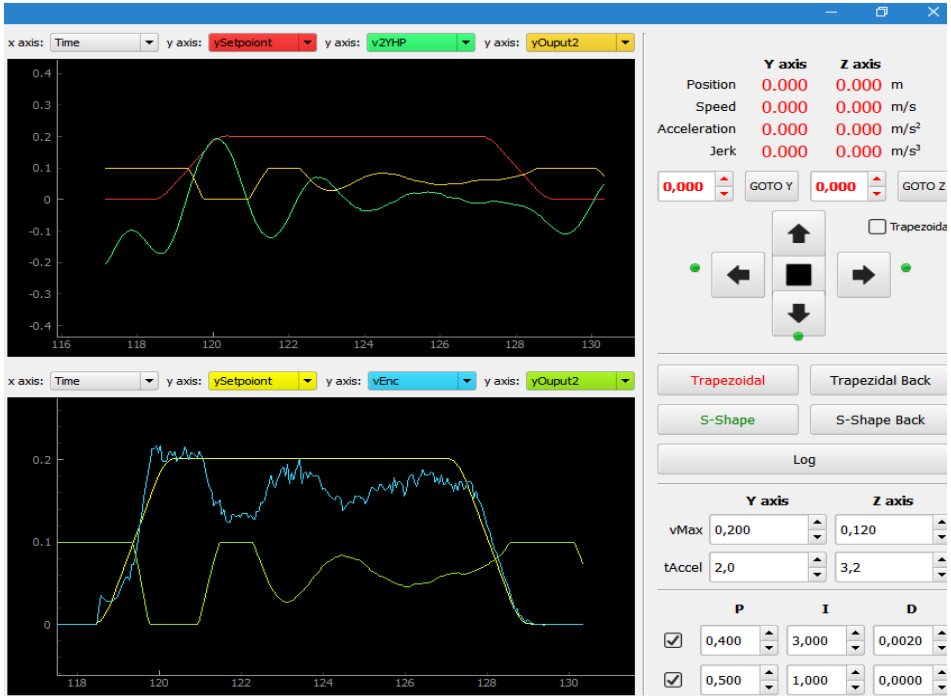


3.41 pav. Valdymo algoritmo blokinė schema,
Fig. 3.41. The block diagram of control algorithm

Vientisos linijos blokai valdymo algoritmo blokinėje schemoje žymi elementus, naudojamus ir kitų mokslininkų, taškuota linija žymimi modifikuoti elementai, brūkšninė su tašku – naujai arba kitų mokslininkų pagrindu sukurti, brūkšninė linija – doktoranto sukurti elementai.

Vežimėlio valdymo blokinė schemoje pagrindinės valdymo užduotys yra atliekamos sistemos pradžioje, kurioje užsiduodamas greičio profilis ir kompensavimo grandyje per grįžtamąjį ryšį, kuriame aptinkami reikšminiai svyravimų pokyčiai, kurie slopinami per netiesinį elementą. Valdymo algoritme vertinami konteinerio svyravimai, kuriuos, integravus ir pritaikius aukšto dažnio filtrą, jis yra paverčiamas proporcinio integralinio (PI) valdiklio įėjimo signalu. Nustačius konteinerio judėjimo greitį (kuris turi atitikti vežimėlio judėjimo greičiui) apskaičiuojama jo judėjimo paklaida. Priklausomai nuo jos dydžio yra proporcingai keičiamas vežimėlio judėjimo greitis (mažinamas) iki tam tikros ribos. Visiškai sustabdyti ar pakeisti judėjimo krypties lauko sąlygomis nėra galimybės, todėl daugelis siūlomų modelių, nors ir leidžia gauti geresnius rezultatus, tačiau neturi

praktinio pritaikomumo. Vežimėlio judėjimo greitis yra mažinamas iki 40 % nuo maksimalaus judėjimo greičio. Kokią įtaką šis valdymo algoritmas daro vežimėlio judėjimo greičiui, pateikiamas programos lango vaizdas 3.42 paveiksle.



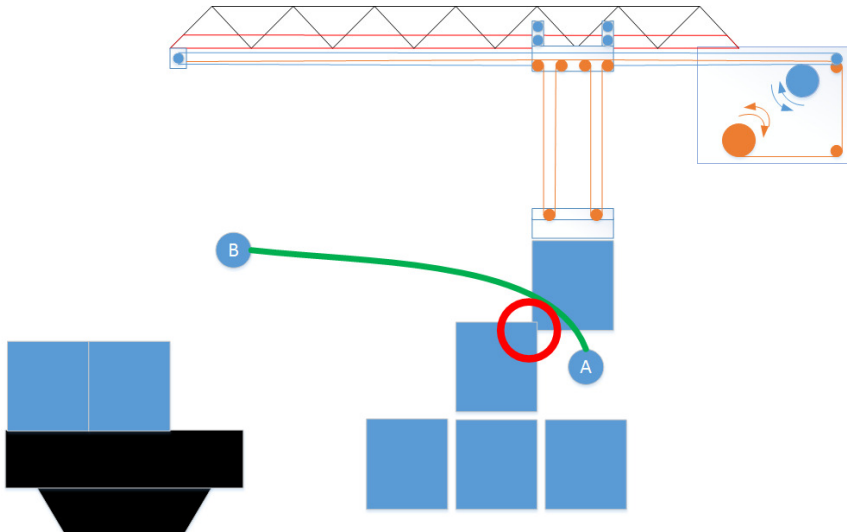
3.42 pav. Valdymo ir stebėjimo programos langas

Fig. 3.42. The software control and monitoring window

Šiame paveiksle pateikiamas kompiuterio programos lango vaizdas iš sukurtos krantinės kranio stebėjimo ir valdymo programos. Apatinėje dalyje matome, kaip keičiasi vežimėlio judėjimo greitis (žydra linija) priklausomai nuo krovinio judėjimo greičio (viršutinė dalis – žalia linija). Valdymo algoritme kompensavimo grandis generuoja paklaidos dydį (apatinė dalis – žalsva linija), kuris paduodamas pagrindinio PID reguliatoriaus valdymo signalo išėjime. Per netiesinį elementą tiesiogiai keičiamas vežimėlio judėjimo greitis, taip išgaunant slopinimo efektą. Sutapus vežimėlio ir konteinerio judėjimo krypčiai ir greičiui, vežimėlio judėjimo greitis palaipsniui grąžinamas į maksimalų ar artimą maksimaliam, priklausomai nuo krovinio judėjimo greičio.

3.3.2. Valdymo algoritmo eksperimentiniai tyrimai

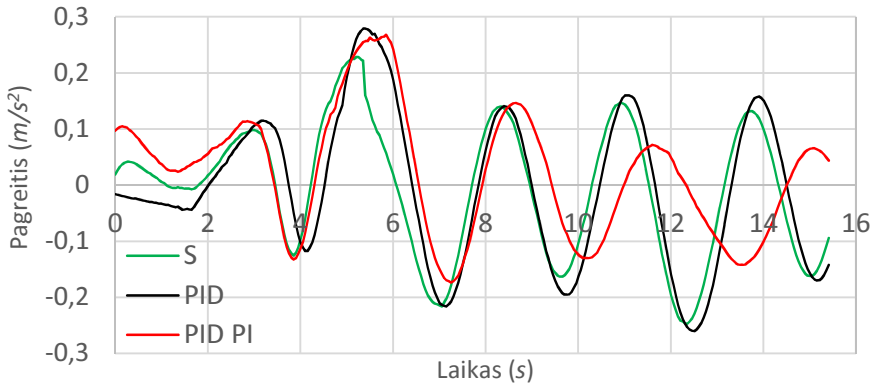
Ankstesniame 3.3.2 poskyryje aprašyto valdymo algoritmo eksperimentiniam patikrinimui panaudotas krantinės krano kėlimo mechanizmo (plačiau aprašytas 3.2 ir 3.3.1 poskyriuose) laboratorinis prototipas. Atsižvelgiant į kitų mokslininkų rezultatus bei įvertinus tai, jog kuriamas praktiškai pritaikomas valdymo sprendimas krantinės kranams, nuspręsta tyrimą atlikti eksperimentiškai. Sukurtą algoritmą įdiegiant į laboratorinio prototipo valdiklį. Siekiant kuo tiksliau atkartoti eksperimentą, kai dėl išorinio poveikio atsiranda konteinerio svyravimas, nuspręsta imituoti konteinerio fizinį kontaktą su kitu konteineriu. Dėl šio kontakto transportavimo metu sužadinami svyravimai. Eksperimento koncepcinė schema pateikiama 3.43 paveiksle.



3.43 pav. Eksperimento koncepcinė schema

Fig. 3.43. The concept of experiment

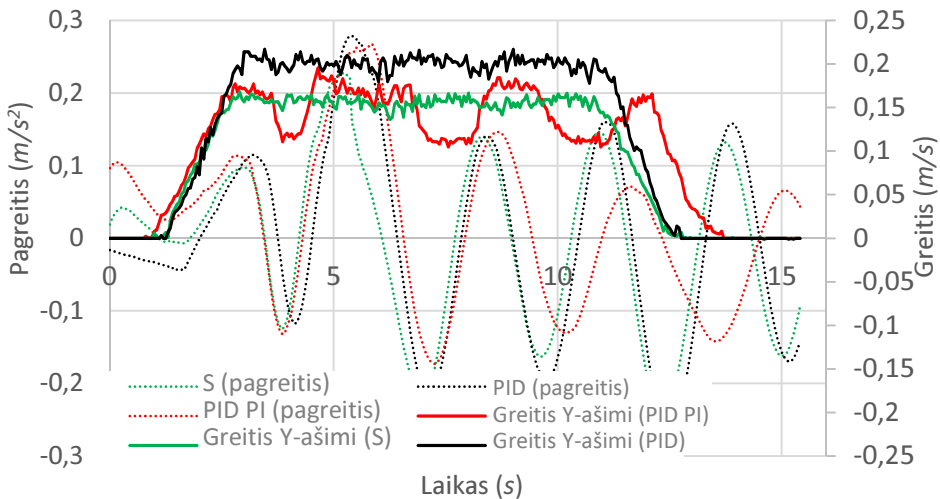
Eksperimento metu imituojamas konteinerio kontaktas su kitu eilėje stovintiu konteineriu, kai kontaktas atsiranda jau pradėjus transportavimo procesą, bet dar nesibaigus kėlimo procedūrai. Konteineris gabenamas iš pradinio taško A į galinį tašką B, kuriame turi likti minimalūs išliekamieji svyravimai, kurie nedarytų didesnės įtakos transportavimo procesui ir nestabdytų krovos. Laukimas, kol konteineris nustos siūbuoti ar mechaninis stabdymas, kai konteineris nukreipiamas į kitą pastatytą konteinerį, nėra saugus ir atima daugiau lauko, lyginant su slopinamu vežimėlio judėjimo greičiu. Eksperimentinio tyrimo rezultatai pateikiami 3.44 paveiksle.



3.44 pav. Eksperimento rezultatai – krovinio svyravimai (S – valdymas taikant tik „S“ formos greičio kitimo profilį, PID – Valdymas taikant PID valdiklį su „S“ formos greičio kitimo profiliumi, PID PI – valdymas taikant sukurta valdymo algoritmą su kompensavimo grandimi)

Fig. 3.44. Experimental results – cargo oscillation (S-control using „S“ shaped velocity profile only, PID – control using PID with „S“-shaped velocity profile, PID PI – control using full developed algorithm with compensation feedback)

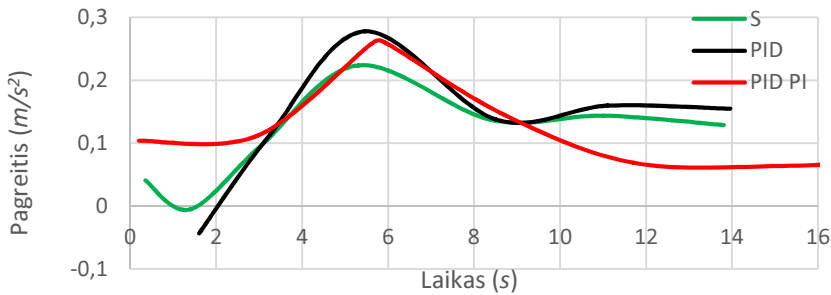
Šiuo eksperimentu, siekta palyginti valdymo sistemos efektyvumą, su įprastomis valdymo technologijomis. Todėl atlikti papildomi matavimai su dvejomis valdymo technologijomis – taikant tik „S“ formos greičio kitimo profilį ir taikant PID valdiklį, kurio įėjime, kaip užduoties signalas, naudojamas „S“ formos greičio kitimo profilis. Gauti rezultatai rodo, kad „S“ formos greičio kitimo profilis duoda vienodą rezultatą kaip ir PID valdiklis. Tačiau ties 13 sekunde matoma, kad naudojant PID valdiklį vežimėlis tą patį atstumą nuvažiuoja ~0,2 s greičiau. Taikant šias valdymo technologijas atsiranda išliekamieji svyravimai, turintys įtakos bendrai krovinio transportavimo trukmei. PID PI valdiklis sukelia akivaizdžiai mažesnius svyravimus. Šių svyravimų vertė būtų dar mažesnė, jei vežimėlio kelias būtų ilgesnis, tačiau to eksperimentiškai įvertinti negalime dėl techninių apribojimų. Laboratorinio prototipe, vežimėlio maksimalus atstumas Y ašimi yra ribotas. Nors taikant PID PI tas pats atstumas pasiekiamas vėliau (3.45 paveikslas – 12–14 sekundę), tačiau atsižvelgiant į kitų valdymo technologijų sukeltų išliekamųjų svyravimų slopinimo trukmę ar priemones, reikalingas jas nuslopinti, galutiname rezultate transportavimo trukmė išlieka trumpesnė. Šiuo eksperimento metu gauti rezultatai pateikiami 3.45 paveiksle.



3.45 pav. Eksperimento rezultatai – vežimėlio judėjimo greitis ir krovinio svyravimai (S – valdymas taikant tik „S“ formos greičio kitimo profilį, PID – Valdymas taikant PID valdiklį su „S“ formos greičio kitimo profiliu, PID PI – valdymas taikant sukurta valdymo algoritmą su kompensavimo grandimi)

Fig. 3.45. Experimental results – trolley velocity and cargo oscillation (S-control using „S“ shaped velocity profile only, PID – control using PID with „S“-shaped velocity profile, PID PI – control using full developed algorithm with compensation feedback)

Dėl grįžtamojo ryšio nebuvimo taikant „S“ formos greičio kitimo profilį ir mechaninės konstrukcijos, bei veikiančios trinties jėgos, vežimėlis nepasiekia užsaiduoto greičio. Pagal valdiklio generuojamą variklio sukimosi dažnį, teoriškai greitis turėtų pasiekti užsaiduotą, tačiau taip nėra. Panaudojus PID valdiklį, dėl grįžtamojo ryšio užsaiduotas greitis yra pasiekiamas, didinant variklio valdymo signalo dažnį (IPM). PID PI algoritmo atveju dėl svyravimų dažnio vežimėlis nesėkmingai pasiekia maksimalaus greičio, kadangi kompensavimo grandis per netiesinį elementą tiesiogiai veikia judėjimo greitį. Šis yra mažinamas, atitinkamai pagal svyravimų amplitudę. Esant ilgesniai vežimėlio judėjimo atstumui ir nusistovėjus svyravimams, vežimėlis važiuotų maksimaliu greičiu, tačiau laboratorinėmis sąlygomis nėra galimybės patikrinti. Nepaisant to, krovinio svyravimai yra slopinami efektyviau. Žemiau pateiktame paveiksle (3.46 paveikslas) matome svyravimų ekstremumus naudojant prieš tai aprašytas valdymo technologijas.



3.46 pav. Eksperimento rezultatai – krovinio svyravimų ekstremumai (S – valdymas taikant tik „S“ formos greičio kitimo profilį, PID – Valdymas taikant PID valdiklį su „S“ formos greičio kitimo profiliu, PID PI – valdymas taikant sukurto valdymo algoritmą su kompensavimo grandimi)

Fig. 3.46. Experimental results – extremums of cargo oscillation (S-control using “S” shaped velocity profile only, PID – control using PID with “S”-shaped velocity profile, PID PI – control using full developed algorithm with compensation feedback)

Pateiktame grafike rezultatai rodo, kad kranų vežimėlio valdymui yra tinkamas PID PI algoritmas. Dėl kompensavimo grandies atsiradę svyravimai slopinami efektyviau. Tačiau norint tiksliau įvirtinti sistemos efektyvumą, būtina nustatyti slopinimo koeficientą kiekvienam atvejui. Turint svyravimų rezultatus ir jų ekstremumus, slopinimo koeficientas ζ yra skaičiuojamas:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (3.7)$$

čia logaritminis dekrementas δ yra lygus:

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{x_0}{x_n}\right). \quad (3.8)$$

čia x_0 – pradinė piko amplitudė, x_n – piko amplitudė, nutolusio per n periodų skaičių nuo pradinio piko x_0 . Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad slopinimo koeficientas S-formos greičio kitimo atveju yra 0,21, PID valdiklio su S-formos greičio kitimo profilio – 0,22, o PID PI – 0,66, o tai yra net iki 66 % efektyviau lyginant su pastarosiomis valdymo technikomis.

Papildomai buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai su skirtingais krovinių ir skirtingais lyno ilgiais, siekiant įvertinti algoritmo efektyvumą įvairiais atvejais.

Taigi buvo atliekami eksperimentai su tuščiu ir pilnu konteineriu, bei su konteineriu gabenant skystą ir nestabilų krovinius. Atitinkamai parenkami ir 3 skirtingi lynų ilgiai – 1 metro, 1,9 metro ir 2,3 metro. Iš gautų rezultatų pagal 3.7 ir

3.8 formules išskaičiuojami slopinimo koeficientai. Kadangi buvo atlikta po 10–20 matavimų su kiekvieno tipo konteineriu visais lynų ilgiais imituojant skirtingo stiprumo kontaktą su eilėje stovinčiu konteineriu, skaičiuojami visų atvejų vidurkiai, kurie pateikiami 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Krovinio svyravimų slopinimo koeficientai taikant valdymo algoritmą esant skirtingoms krovos sąlygoms.

Table 3.4. Cargo oscillation damping ratio using control algorithm with different cargo conditions

Lyno ilgis Konteineris/		Vidutinė slopinimo koeficiento ζ reikšmė			<i>Bendras Vidurkis:</i>
		0,9 m	1,9 m	2,3 m	
Tuščias		0,157	0,066	0,035	<i>0,086</i>
Pilnas		0,072	0,042	0,025	<i>0,046</i>
Nestabilus		0,121	0,065	0,046	<i>0,077</i>
Su skystu kroviniu		0,097	0,017	0,011	<i>0,042</i>
<i>Vidurkis:</i>		<i>0,112</i>	<i>0,048</i>	<i>0,029</i>	<i>0,063</i>

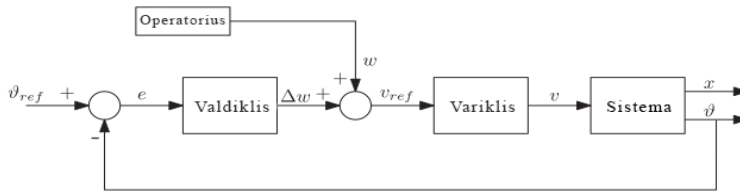
Atlikus eksperimentus ir įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad vienuo valdymo sistemos parametrų taikymas kiekvienam individualiam konteineriui yra netinkamas ir neduodantis norimų rezultatų. Todėl būtina kurti valdymo algoritmus, adaptuotus kiekvienam individualiam konteineriui, atsižvelgiant jo transportavimo parametrus bei charakteristikas. 3.3 lentelėje gauti rezultatai rodo, kad sukurtas valdymo algoritmas nekeičiant jo parametrų (neindividualizuojant jo kiekvienam konteineriui) geriausią rezultatą rodo esant trumpam (0,9 m) lyno ilgiui, kuriame slopinimo koeficientas vidutiniškai kinta nuo 0,072 gabenant sunkų konteinerį iki 0,157 gabenant tuščią konteinerį. Valdymo algoritmo efektyvumas mažiausias esant ilgam lynui (2,3 m). Šiuo atveju slopinimo koeficientas vidutiniškai siekia 0,029 vertę.

Atlikus eksperimentinius matavimus ir analizuojant gautus rezultatus pastebėta, kad nestabilus ir skystas konteineris, dėl krovinio judėjimo, priklausomai nuo trajektorijos, stiprina arba slopina atsirandančius svyravimus net ir nenaudojant kompensavimo grandies. Šio tipo kroviniams būtinas specifinis valdymo sistemos parametrų adaptavimas ar net valdymo algoritmo modifikavimas, norit pasiekti svyravimų slopinimą visais atvejais – siekiant išvengti atvirkštinio efekto, kai nestabilus krovinys sužadina slopstančius svyravimus.

Atsižvelgiant į vienus išsamesnių praktinių eksperimentinių tyrimų, atliktų mokslininko A. Arena (Arena, Casalotti, Lacarbonara, & Cartmell, 2015) su krantinės kranu Cagliari terminale (Sardinija, Italija), matavimų metu gautas konteinerio svyravimo charakteristikas, atsiradimo bei jų slopimo priežastis, empiriniu būdu atliekant vizualinį gautų rezultatų palyginimą, nustatyta, kad eksperimentiškai gauti rezultatai naudojant sukurtą krantinės kranu laboratorinį prototipą, vertinant krovinio svyravimų charakteristikas, iki 95 % sutampa su konteinerio svyravimo charakteristikomis krantinės kranu. Siekiant įvertinti sukurto valdymo algoritmo efektyvumą nuspręsta palyginti gautus rezultatus su kitų mokslininkų sukurtų valdymo algoritmų gautais rezultatais. Tam, kad šis verifikavimas būtų kuo tikslesnis – pasirinkti tik tie valdymo algoritmai, kurie buvo testuojami sąlygose atitinkančiose ar iš dalies atitinkančiose disertacijoje atliktų eksperimentų sąlygoms, įvertinant lyno ilgio ir krovinio masės proporcijas.

Ermidoro ir kitų (Ermidoro, Cologni, Formentin, & Previdi, 2016) eksperimentų atveju lyginamos dvi valdymo technologijos. PID valdiklis su laike nekintančiomis valdymo charakteristikomis (angl. *Time invariant controller* – K_{TI}) ir patobulintas PID valdiklis, kuriame planuojamas valdymo dažnis (angl. *Fixed-order gain-scheduling control* – K_{GS}) tam tikrose ribose siekiant slopinti krovinio svyravimus. Šios valdymo sistemos struktūrinė schema pateikiama 3.47 paveiksle.

Taikant sukurtą valdymo sistemą buvo atlikti eksperimentiniai matavimai. Ermidoro ir kiti atliko eksperimentinius matavimus su 60 kg kroviniu esant 3,0 m, 4,5 m, ir 6,0 m lyno ilgiams. Empiriniu būdu paskaičiuotas slopinimo koeficientas abiem valdymo metodams. Dėl matavimų rezultatuose esančio triukšmo vizualiai nustatyti slopinimo koeficientą K_{TI} valdiklio atvejais, kai lyno ilgis yra 4,5 m ir 6,0 metro atstumu, nepavyko. Kai lyno ilgis siekia 3,0 m – slopinimo koeficiento vertė siekia vos 0,009, kas yra apie 2 kartus prasčiau, nei blogiausias mūsų matavimų rezultatas, gautas eksperimentinio tyrimo metu.



3.47 pav. Blokinė valdymo sistemos schema (Ermidoro *et al.*, 2016)

Fig. 3.47. Control system block diagram (Ermidoro *et al.*, 2016)

Vertinant valdymo sistemos efektyvumą kai naudojamas K_{GS} valdiklis ir lyno ilgis siekia 3,0 m, slopinimo koeficiento vertė lygi 0,03, kai tuo tarpu disertacijoje esant trumpo lyno atveju, slopinimo koeficientas vidutiniškai daugiau nei 73 % didesnis. 4,5 m ir 6,0 lyno ilgio atvejais slopinimo koeficientų vertės siekia 0,061

ir 0,057, tai yra 3 % ir 9 % mažiau nei disertacijoje eksperimentiškai gautas slopinimo koeficientas. Tačiau atskirai vertinant ilgo lyno atveju geriausią rezultatą, mūsų atveju jis yra apie 15 % prastesnis. Atsižvelgiant į mokslininkų, Ermidoro ir kitų gautus rezultatus galima teigti, kad jo sistema geriau slopina krovinio svyravimus ilgo lyno atveju. Tačiau vidutinis slopinimo koeficientas disertacijoje tirtu atveju yra 21 % didesnis.

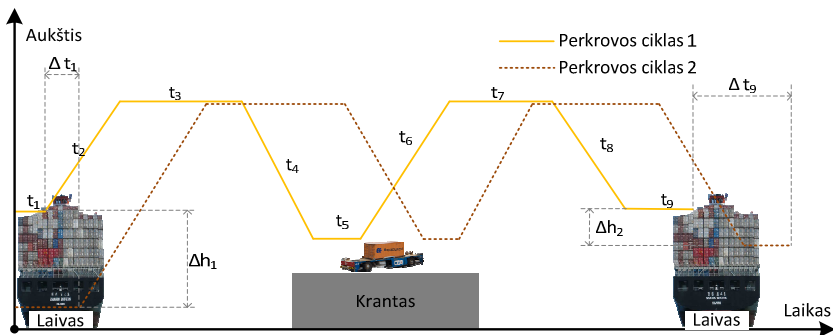
Kiti mokslininkai J. Melorose ir kiti (Melorose, Perroy, & Careas, 2015) laboratoriniame stende atliko eksperimentinius tyrimus bei nustatė, kad išliekamųjų svyravimų savaiminio slopimo koeficientą kuris yra lygus 0,005324. Mokslininkai taip pat kūrė valdymo algoritmą skirtą išliekamiesiems svyravimams mažinti. Sukurtas valdymo algoritmas, kaip ir prieš tai analizuotas, yra paremtas valdymo signalo dažnio keitimu. Eksperimentai buvo atliekami su laboratoriniu prototipu, kai lyno ilgis siekia 0,5 m vertinant ir judantį krovinį, kuris imituojamas tiesinės pavaros pagalba. Įvertinus gautus rezultatus ir paskaičiavus slopinimo koeficientą nustatyta, kad jo vertė siekia nuo 0,1 iki 0,078. Lyginant su disertacijoje aprašytais rezultatais, trumpiausio lyno (0,9 m) atveju vidutiniškai slopinimo koeficiento vertė siekia 0,112, o geriausio matavimo 0,157, tai yra nuo 12 % iki 57 % efektyviau lyginant su J. Melorose algoritmo rezultatais. Mokslininkai Park Ki-ru ir kiti (Park & Kwon, 2010), sukūrė valdymo sistema svyravimų kompensavimui, tačiau šiuo atveju jis taikomas mobiliam uosto kranui, kuris sumontuotas ant laivo. Darbe pateikiami rezultatai lygintini su disertacijos nagrinėjama problematika dėl valdymo algoritmo pobūdžio, kuris kaip alternatyva galėtų būti taikomas krantinės kranuose. Eksperimentai atlikti dviem atvejais, kai nėra bangavimo (kranas sumontuotas stabiliai) ir esant jūros bangavimui, kuris imituojamas laboratoriniame prototipe. Pirmuoju atveju, kai nėra bangavimo slopinimo koeficiento vertė yra 0,09, antruoju atveju lygi 0,078. Išanalizavus eksperimento situaciją ir įvertinus prototipą eksperimentuose atlikti tyrimai esant trumpam lyno ilgiui. Lyginant su disertacijoje aprašytu valdymo algoritmu ir jo eksperimento rezultatais, pastarieji duoda iki 24 % geresnius rezultatus.

Qian Dianwei ir kiti (Qian, Tong, & Lee, 2016) sukūrė valdymo algoritmą, kuriame taikoma neraiškioji logika. Įvertinus pateiktą informaciją nustatyta, kad eksperimentai buvo atliekami su maža konteinerio mase (iki 0,5 kg) ir trumpu lynu iki (0,5 metro) todėl mūsų atveju ekvivalentas būtų trumpas lynas, esant tuščiam konteineriui. Atliktuose mokslininko eksperimentuose ir palyginimuose geriausias rezultatas užfiksuotas, kai jo slopinimo koeficiento vertė siekia 0,091, kas lyginant su mūsų atveju yra 42 % mažiau. Kituose mokslininkų darbuose, vertinant geriausią gautą rezultatą, kai eksperimentai buvo atliekami esant ekvivalentai disertacijoje aprašytai situacijai, suskaičiuoti jų rezultatų slopinimo koeficientai pateikti procentine išraiška lyginant su autoriaus gautais rezultatais yra: Sorensen Khalid (Sorensen *et al.*, 2008) – 0,111 (iki 10 % prastesnis); Tomczyk Jerzy (Tomczyk *et al.*, 2014) – 0.046 (iki 50 % prastesnis). Algoritmų kūrimas

krantinės kranų valdymui ir krovinių svyravimų mažinimui analizuotas ir kituose mokslininkų darbuose (Arena *et al.*, 2015; Huh & Hong, 2002; Jaafar, Mohamed, Abidin, *et al.*, 2013; Jaafar, Sulaima, *et al.*, 2013; Majid *et al.*, 2013; Ngo, Hong, & Hong, 2011; Ngo *et al.*, 2012; Omar & Nayfeh, 2005; Smoczek, 2014; T.-S. Wu *et al.*, 2016), tačiau dėl matuojamų parametrų ar kitų veiksnių nustatyti gautuose rezultatuose slopinimo koeficiento nebuvo galimybės, todėl 1 skyriuje detalizuota tik keletas pagrindinių mokslininkų sukurtų valdymo algoritmų, kurie artimiausi disertacijoje pateiktai valdymo sistemai.

3.3.3. Konteinerių krovos proceso lauko eksperimentiniai tyrimai

Sukurta krantinės kranų valdymo sistema su kompensavimo grandimi „žaliojo“ transporto koridoriaus ir autonominių konteinerių terminalų kūrimo koncepcijoje leis efektyviau išnaudoti turimus uosto infrastruktūros resursus, užtikrinant trumpesnę bendrą perkrovos ciklą trukmę. Norint nustatyti, kuriose perkrovos ciklo procedūrose galima efektyviau vykdyti krovą laiko atžvilgiu, atliktas konteinerių perkrovos proceso lauko eksperimento (organoleptinis) tyrimas, kurio metu vizualiai stebėtas ir registruotas (užfiksuojant laiką kiekvienoje procedūroje) konteinerių perkrovos ciklas „laivas–krantas–laivas“. Stebėjimais siekta nustatyti konkrečių perkrovos procedūrų, tokių kaip konteinerio paėmimas, pakėlimas, nuleidimas ir padėjimas, trukmę, „Smeltė“ konteinerių terminale esančiame Klai-pėdos uoste.



3.48 pav. Lauko eksperimento koncepcinis modelis

Fig. 3.48. The concept of field experiment

Eksperimento metu nustatytos devynios pagrindinės perkrovos ciklo „laivas–krantas–laivas“ procedūros, atliekamos transportavimo metu, kurios pateikiamos koncepciniame lauko eksperimento modelyje 3.48 paveiksle. Atsižvelgiant į kon-

teinerių steko struktūrą ir dydį, priklausomai nuo transportuojamo konteinerio padėties skiriasi ir bendras minimalus kėlimo aukštis, kuriame krano konstrukcija leidžia vykdyti kitas perkrovos ciklo procedūras. Taip pat bendra transportavimo trukmė priklauso ir nuo konteinerio paėmimo trukmės Δt_1 ir konteinerio padėties steke (aukščio) Δh_1 .

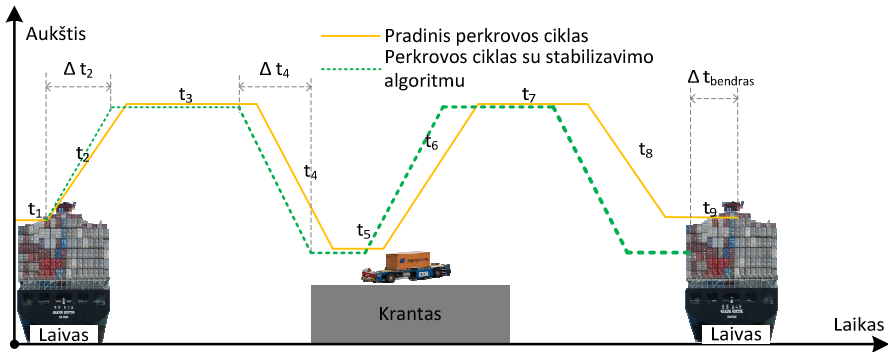
3.5 lentelė. Konteinerių perkrovos proceso lauko eksperimento tyrimo rezultatai
Table 3.5. Results of field experiments during container transportation process

Krovos procedūra	Minimali trukmė, s	Maksimali trukmė, s	Vidutinė trukmė, s
Paėmimas – laive, t_1	6	33	16
Pakėlimas – iš laivo, t_2	8	22	10
Transportavimas – į krantą, t_3	9	26	13
Nuleidimas – į krantą, t_4	8	31	12
Padėjimas – krante, t_5	5	28	18
Perkrovos ciklo dalies „laivas–krantas“ trukmė	36	140	69

Transportuojant žemiau esantį konteinerį, jo paėmimui reikės daugiau laiko – atitinkamai ilgiau truks ir pakėlimas (papildomai reikia pakelti skirtumą Δh_1), kas įtakoja ir bendrą transportavimo trukmę, kuri kinta Δt_1 paklaidos ribose. Taigi lauko eksperimento tyrimo metu gauti rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

Įvertinus tirtą Klaipėdos terminalo darbo režimą bei turimą papildomą vaizdinę medžiagą, surinktą stažuotės Olandijoje metu, kurioje vykdoma konteinerių krova Roterdamo uoste, nuspręsta registruoti tik proceso „laivas–krantas“ krovos procedūrų trukmę. Konteinerių perkrovos proceso praktinio lauko eksperimento tyrimo metu nustatyta, kad minimali, stebėjimo metu užfiksuota, perkrovos ciklo dalies „laivas–krantas“ trukmė – 39 sekundės, maksimali – 140 sekundžių ir vidutinė – 69 sekundės. Įvertinus griebtuvo transportavimo atgal į laivą laiką, galima teigti, kad vidutiniškai per valandą perkraunama apie 40 konteinerių.

Atsižvelgiant į lauko eksperimento tyrimo rezultatus ir įvertinus sukurto krantinės krano valdymo algoritmo su stabilizavimo grandimi charakteristikas, galima, interpretuojant rezultatus, nustatyti perkrovos ciklo procedūras, kuriuose įmanoma pasiekti didesnį krovos efektyvumą. Įvertinus 3.3 skyriuje aprašytų eksperimentinių tyrimų rezultatus, sudaryta perkrovos ciklo koncepcija (3.49 paveikslas) kuri teoriškai lyginama su lauko eksperimento koncepcija, siekiant pa-vaizduoti perkrovos procedūras, kuriose tikėtinas didesnis transportavimo efektyvumas, įdiegus skurtą valdymo sistemos koncepciją.



3.49 pav. Valdymo algoritmo efektyvumo koncepcinis modelis
 Fig. 3.49. The concept of control algorithm efficiently

Lyginant pradinį perkrovos ciklą su perkrovos ciklu, kai taikomas sukurtas valdymo algoritmas su svyravimų kompensavimo grandimi, didesnio efektyvumo galime pasiekti t_2 , t_4 , t_6 , t_8 , procedūrose. Kadangi valdymo algoritmas kompensuoja startavimo ir kėlimo metu sužadintus svyravimus, atitinkamai gali būti spartinamas konteinerio pakėlimas. Konteinerio transportavimo (t_3) trukmė gali nežymiai pailgėti dėl krovinio stabilizavimo algoritmo veikimo charakteristikų, tačiau stabilizuotas krovinytis atitinkamai gali būti greičiau nuleidžiamas ir padedamas, lyginant su pradiniu perkrovos ciklu. Atitinkamai ir „krantas–laivas“ perkrovos procedūrose. Atsižvelgiant į tai, kad kiekvienas transportuojamas konteineris yra individualus (turintis specifines transportavimo charakteristikas) bei įvertinus jas galima atskiram konteineriui didinti Δt_2 , Δt_4 , trukmę, siekiant padidinti transportuojamo krovinio saugumą. Tačiau bendras $\Delta t_{bendras}$ statistinis visų konteinerių perkrovos trukmė sumažinamas užtikrinant specifinių krovinių transportavimo saugumą ir spartinant nedužių krovinių perkrovos laiką. Siekiant statistiškai įvertinti vieno konteinerio perkrovos ciklo trukmės pokytį naudojant pasiūlytą valdymo metodiką, laboratoriniame krantinės kranų prototipe atliktas eksperimentinis tyrimas, kuriame naudojamas valdymo algoritmas su svyravimų kompensavimo grandimi. Lauko eksperimentinių tyrimų metu nustatytos perkrovos ciklo charakteristikos realizuotos realiuose standartiniuose kranuose taikomu valdymo algoritmu. Tyrimo metu buvo atlikta 40 perkrovos ciklų „laivas–krantas“, transportavimo metu taikant skirtingas sąlygas ir skirtingus krovinių tipus (aprašytus 3 skyriuje).

Tyrimo rezultatai parodė, kad taikant sukurtą valdymo metodiką standartiniam perkrovos ciklui „laivas–krantas“, statistinė vidutinė vieno konteinerio perk-

rovos ciklo trukmė sutrumpėja 8 %. Atsižvelgiant lauko eksperimento tyrimų rezultatus, perkrovos ciklo „laivas–krantas“ vidutinė trukmė sutrumpėtų ~6 sekundėmis. Taigi per tą patį tirtą laiko tarpą galima perkrauti trimis konteineriais daugiau.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus eksperimentus su trapeciniu ir S-formos greičio kitimo profiliais ir įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad mažesnė konteinerio svyravimų amplitudė yra su S-formos greičio kitimo profiliu. Todėl tolimesniuose tyrimuose buvo naudojamas tik šis profilis.
2. Sudarytas matematinis modelis Matlab Simulink aplinkoje su uždara valdymo sistema skirta valdyti vežimėlio greitį PID valdikliu ir kompensuoti krovinio svyravimus su PI papildomu valdymo kontūru. Atlikus matematinį modeliavimą, nustatytos pradinės PID ir PI valdiklių parametrų reikšmės, kurios panaudotos atliekant eksperimentinius bandymus su krantinės krano prototipu – PID valdiklio : $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$, o papildomo PI valdiklio: $K_p = 0,2$, $K_i = 2$.
3. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad pasiūlytas valdymo algoritmas lyginant jį su valdymu naudojant tik greičio kitimo profilius, 66 % efektyvesnis slopinant krovos metu atsiradusius konteinerio svyravimus.
4. Atlikti eksperimentai esant skirtingiems lynų ilgiams (0,9 m, 1,9 m, 2,3 m) bei su skirtingais krovniais ir jų svoriais. Nustatyta, kad naudojant pasiūlytą valdymo algoritmą, vidutiniškai perkraunant 40 konteinerių statistinis vidutinis vieno konteinerio krovos ciklas sutrumpėja 8 %.

Bendrosios išvados

1. Literatūros šaltinių analizė rodo, kad diegiant „žaliojo uosto“, „autonominio krantinės kranų“ ir „išmanaus konteinerio“ koncepcijas nacionaliniame uoste, bendrame transporto inžinerijos uždavinyje, kaip atskiru objektu moksliniame tyrime, galima išskirti konteinerio „laivas–krantas–laivas“ perkrovos mazgo efektyvumo svarbą. Konteinerių perkrovos spartos didinimas kuriuose autonominiuose uostuose yra tiesiogiai siejamas su autonominio krantinės kranų valdymo sistemos gebėjimu pritaikyti individualizuotą konkrečiam išmaniam konteineriui perkrovos technologinį režimą, panaudojant iš RDA sąsajos išgautą informaciją apie krovinio pobūdį.

2. Sukurtas krantinės kranų mechaninius procesus aprašantis antros eilės diferencinių lygčių modelis, būtinas konteinerio krovos metu atsirandančių dinaminių apkrovų imitacijai, kurios rezultatai itin svarbūs programuojant: kranų vežimėlio judėjimo greičio profilius aprašančius realius krovinio erdvinio judėjimo greičius, momentinius pagreičius, galimą svyravimų amplitudę, griebtuvo stabilizavimosi ir bendrą transportavimo trukmes.

3. Sukurtas autonominio krantinės kranų laboratorinis prototipas su išmaniąja sistema valdančiu algoritmu, leidžiančiu saugiai ir sparčiai vykdyti konteinerių krovą cikle „laivas–krantas–laivas“:

3.1. Sukurtas integruotas autonominio krantinės kranų valdymo algoritmas su pasiūlyta įterptine konteinerių svyravimus slopinančia paprograme, leidžiančia valdymo sistemoje panaudoti PID (nustatyti parametrai: $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$) valdiklį su papildomu PI (nustatyti parametrai: $K_p = 0,2$, $K_i = 2$) grįžtamuju ryšiu ir S-formos signalu.

3.2. Sukurtas laboratorinis krantinės kranų maketas leido eksperimentu patikrinti teorines ir imitacijos metu gautas išvadas, kad krovoje pasirinkus S-formos kranų vežimėlio judėjimo greičius dinamiame režime, galima išgauti optimalų sprendimą, kokiais krovo režimais transportuoti konkretų konteinerį, sutrumpinant perkrovos ciklą.

4. Palyginamųjų ir eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad taikant darbe pasiūlytą autonominio krantinės kranų valdymo algoritmą su svyravimus slopinančia posisteme galima sparčiau atlikti konteinerių krova, nes, atlikus daugiau nei 400 krovo ciklų su skirtingais kroviniais, gautas konteinerių svyravimų slopimo vidutinis statistinis koeficientas yra 0,068, kuris yra 21 % didesnis nei ekvivalenčioje situacijoje eksperimentiškai gautas žinomas rezultatas (0,056). Eksperimentu patvirtinta, kad naudojant pasiūlytą technologiją, vidutiniškai perkraunant 40 konteinerių statistinis vidutinis vieno konteinerio krovo ciklas sutrumpėja 8 %.

Literatūra ir šaltiniai

Ahmad, M. A., Saealal, M. S., Zawawi, M. A., & Raja Ismail, R. M. T. (2011). Classical angular tracking and intelligent anti-sway control for rotary crane system. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, p. 82–87. IEEE. <http://doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953854>

Arena, A., Casalotti, A., Lacarbonara, W., & Cartmell, M. P. (2015). Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification. *International Journal of Mechanical Sciences*, 93, 8–21. <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.11.024>

Barysienė, J. (2012). A multi-criteria evaluation of container terminal technologies applying the COPRAS-G method. *Transport*, 27(4), 364–372. <http://doi.org/10.3846/16484142.2012.750624>

Béarée, R. (2014). New Damped-Jerk trajectory for vibration reduction. *Control Engineering Practice*, 28, 112–120. <http://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.03.010>

Bogdevičius, M., & Vika, A. (2005). Investigation of the dynamics of the overhead crane lifting process in the vertical plane. *Transport*, 20(5), 176–180.

Bogdevičius, M. (2012). *Mechatroninių sistemų ir elementų modeliavimas*. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. <http://doi.org/10.5755/e01.9786090204061>

Bukkapatnam, S. T. S., Mukkamala, S., Kunthong, J., Sarangan, V., & Komanduri, R. (2009). Real-time monitoring of container stability loss using wireless vibration jutikliniu

tags. *2009 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 221–226. <http://doi.org/10.1109/COASE.2009.5234115>

Cai, B., Huang, S., Liu, D., & Dissanayake, G. (2014). Rescheduling policies for large-scale task allocation of autonomous straddle carriers under uncertainty at automated container terminals. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(4), 506–514.

Cao, L., & Liu, L. (2011). Adaptive Fuzzy Sliding Mode Method-Based Position and Anti-swing Control for Overhead Cranes. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, (2), 335–338. <http://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.85>

Cha, J.-H., Roh, M.-I., & Lee, K.-Y. (2010). Dynamic response simulation of a heavy cargo suspended by a floating crane based on multibody system dynamics. *Ocean Engineering*, 37(14–15), 1273–1291. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.06.008>

Chang, C., Chiang, K., & Description, A. S. (2008). The nonlinear 3-D crane control with an intelligent operating method. *SICE Annual Conference*, 2917–2921.

Chang, D., Jiang, Z., Yan, W., & He, J. (2010). Integrating berth allocation and quay crane assignments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 975–990. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2010.05.008>

Chao, S.-L., & Lin, Y.-J. (2011). Evaluating advanced quay cranes in container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 432–445. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.002>

Crainic, T. G., & Kim, K. H. (2007). Intermodal Transportation. *Handbook in OR & MS*, 14(6), 467–537. [http://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](http://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6)

Daqaq, M. F., Masoud, Z. N., & Nayfeh, A. H. (2005). Nonlinear Modeling and Control of Quay-Side Container Cranes. *Engineering Science and Mechanics*, 1–11.

Elbadawy, A. A., & Shehata, M. M. G. (2015). Anti-sway control of marine cranes under the disturbance of a parallel manipulator. *Nonlinear Dynamics*, 82(1–2), 415–434. <http://doi.org/10.1007/s11071-015-2165-3>

Ermidoro, M., Cologni, A. L., Formentin, S., & Previdi, F. (2016). Fixed-order gain-scheduling anti-sway control of overhead bridge cranes. *Mechatronics*, 0, 1–11.

Fang, Y., Wang, P., & Zhang, X. (2012). A Motion Planning-Based Adaptive Control Method for an Underactuated Crane System. *IEEE Transactions on control systems technology*, 20(1), 241–248.

Georgijević, M. (2010). Container Terminals in River Ports. *FME Transactions*, 34, 199–204.

Huh, C. Do, & Hong, K. S. (2002). Input shaping control of container crane systems: Limiting the transient sway angle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(1), 445–450.

- Yang, C., Zhang, Z., & Zhao, Q. (2008). Study on Intelligent Control of Two-Dimensional Precision Positioning System. *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering* (T. 4, p. 835–838). IEEE. <http://doi.org/10.1109/CSSE.2008.1211>
- Yin, M. Y. M., Wang, X. W. X., & Zhang, R. Z. R. Standardization and Integration of Information System in International Container Logistics, *2008 4th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing 25–28 (2008)*. IEEE. <http://doi.org/10.1109/WiCom.2008.2847>
- Yoke, M., Low, H., Member, S., Zeng, M., Hsu, W. J., Huang, S. Y., Win, C. A. (2011). Improving Safety and Stability of Large Containerships in Automated Stowage Planning. *IEEE Systems journal*, 5(1), 50–60.
- Yoshihara, H., Fujioka, N., & Kasahara, H. (2003). A new vision-jutikliuless anti-sway control system for container cranes. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, 1, 262–269. <http://doi.org/10.1109/IAS.2003.1257512>
- Iru, R. H. (2014). Modeling and Control Design for Rotary Crane System using MATLAB Simscape Toolbox. *Control and System Graduate Research Colloquium*, 170–175.
- Ismail, R. M. T. R., Ahmad, M. A., Ramli, M. S., & Rashidi, F. R. M. (2009). Nonlinear Dynamic Modelling and Analysis of a 3-D Overhead Gantry Crane System with Payload Variation. *2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 350–354. <http://doi.org/10.1109/EMS.2009.71>
- Jaafar, H. I., Mohamed, Z., Abidin, A. F. Z., & Ghani, Z. A. (2013). PSO-tuned PID controller for a nonlinear gantry crane system. *Proceedings – 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2012*, 515–519. <http://doi.org/10.1109/ICCSCE.2012.6487200>
- Jaafar, H. I., Mohamed, Z., Jamian, J. J., Abidin, A. F. Z., Kassim, A. M., & Ghani, Z. A. (2013). Dynamic Behaviour of a Nonlinear Gantry Crane System. *Procedia Technology, 11(Iceei)*, 419–425. <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.211>
- Jaafar, H. I., Sulaima, M. F., Mohamed, Z., & Jamian, J. J. (2013). Optimal PID controller parameters for nonlinear gantry crane system via MOPSO technique. *Proceedings – 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology, IEEE CSUDET 2013*, 86–91. <http://doi.org/10.1109/CSUDET.2013.6670992>
- Juang, Y., & Roe, M. (2010). A Study on Success Factors of Development Strategies for Intermodal Freight Transport Systems. *Transportation*, 8, 722–732.
- Kawai, H., Choi, Y., Kim, Y. B., & Kubota, Y. (2008). Position measurement of container crane spreader using an image jutikliu system for anti-sway controllers. *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, 683–686. <http://doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694588>
- Kawai, H., Choi, Y., Kim, Y. B., & Kubota, Y. (2009). Measurement system design for sway motion based on image jutikliu. *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*, 185–188. <http://doi.org/10.1109/ICNSC.2009.4919269>

Kim, K. H., & Lee, H. (2015). *Container Terminal Operation: Current Trends and Future Challenges*. *Handbook of Ocean Container Transport Logistics*. http://doi.org/10.1007/978-3-319-11891-8_2

Knight, C. E., Becerra, V., Holderbaum, W., & Mayer, R. (2012). Modelling and simulating the operation of RTG container cranes. *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, F24–F24. <http://doi.org/10.1049/cp.2012.0362>

Lee, H.-H. (2004). A new design approach for the anti-swing trajectory control of overhead cranes with high-velocity hoisting. *International Journal of Control*, 77(January 2015), 931–940. <http://doi.org/10.1080/00207170412331270550>

Lee, K. J., Shin, D., Lee, J. P., Kim, T. J., & Kim, H. J. (2013). Experimental investigation on the hybrid smart green ship. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (T. 8103 LNAI, p. 338–344).

Li, P., Li, Z., & Yang, Y. (2012). The Application Research of Ant Colony Optimization Algorithm for Intelligent Control on Special Crane. *2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control* (p. 999–1004). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IMCCC.2012.238>

Liu, C., Zhao, H., & Cui, Y. (2011). Research on Application of Fuzzy PID in Collective Pitch Control System. *2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)*, 1–4. <http://doi.org/10.1109/ICCASE.2011.5997553>

Lukasik, Z. (2011). The Land Trans-Shipping Terminal In Processes Flow Stream Individuals Intermodal Transportation. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 5(3).

Lv, N., Li, H., Li, M., & Hou, M. (2012). Based on PID Control Optimization Of Synchronous Motor Control. *Conference on Measurement, Information and Control (MIC)*, 2111–2114.

Maigret, A. (2014). Sustainability Reporting in the Port Sector. *IIIEE Master thesis*, (June), 99. Gauta <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4696778>

Majid, M. A., Ibrahim, W. S. W., Mohamad, S., & Bakar, Z. A. (2013). A comparison of PID and PD controller with input shaping technique for 3D gantry crane. *Proceedings – 2013 IEEE Conference on Systems, Process and Control, ICSPC 2013*, (December), 144–148. <http://doi.org/10.1109/SPC.2013.6735121>

Maneeratanaporn, J., & Murakami, T. (2012). Anti-sway sliding-mode with trolley disturbance observer for overhead crane system. *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC*, 0–5. <http://doi.org/10.1109/AMC.2012.6197014>

Masoud, Z. N. (2005). Sway Reduction on Quay-side Container Cranes Using Delayed Feedback Controller: Simulations and Experiments. *Journal of Vibration and Control*, 11(8), 1103–1122. <http://doi.org/10.1177/1077546305056300>

- Masoud, Z. N. (2009). Effect of hoisting cable elasticity on anti-sway controllers of quay-side container cranes. *Nonlinear Dynamics*, 58, 129–140. <http://doi.org/10.1007/s11071-009-9465-4>
- Meyer-Larsen, N., Lyridis, D., Müller, R., & Zacharioudakis, P. (2012). Improving intermodal container logistics and security by RFID. *International Journal of RF Technologies: Research and Applications*, 3(1), 15–38.
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). GAIN-SCHEDULING APPROACH TO MASS DAMPER TYPE ANTI-SWAY SYSTEM DESIGN. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1(c), 263–268. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Monios, J., & Bergqvist, R. (2015). Intermodal terminal concessions: Lessons from the port sector. *Research in Transportation Business and Management*, 14, 90–96.
- Monios, J., & Wilmsmeier, G. (2013). The role of intermodal transport in port regionalisation. *Transport Policy*, 30, 161–172. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.09.010>
- Nenad, Z., Oguamanam, D., & Bošnjak, S. (2006). Dynamics and modelling of mega quayside container cranes. *FME Transactions*, 34, 193–198.
- Ngo, Q. H., Hong, G., & Hong, K.-S. (2011). Sway suppression of an offshore container crane. *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 1388–1393. <http://doi.org/10.1109/SII.2011.6147652>
- Ngo, Q. H., Nan, Y., & Hong, K. (2012). Command Shaping for Vibration Reduction of Container Cranes. *International Conference on Control, Automation and Systems*, 651–655.
- Nundrakwang, S., Benjanarasuth, T., Ngamwiwit, J., & Komine, N. (2008). Multivariable control of overhead crane system by CRA method. *2008 SICE Annual Conference*, 1(3), 3278–3282. <http://doi.org/10.1109/SICE.2008.4655231>
- Oguamanam, D. (2006). Dynamics and modelling of mega quayside container cranes. *FME Transactions*, 34, 193–198.
- Omar, H. M., & Nayfeh, A. H. (2005). Gantry cranes gain scheduling feedback control with friction compensation. *Journal of Sound and Vibration*, 281(1–2), 1–20. <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.01.037>
- Pan, Y., Liang, C., & Liu, L. (2011). The modeling of main hoist mechanism of quay container crane. *Proceedings – 2011 4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2011*, 3, 377–381. <http://doi.org/10.1109/ICIII.2011.373>
- Park, K., & Kwon, D. (2010). Swing-Free Control of Mobile Harbor Crane with Accelerometer Feedback. *International Conference on Control, Automation and Systems*, 1322–1327.
- Parola, F., & Sciomachen, A. (2005). Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models. *International Journal of Production Economics*, 97(1), 75–88.

Paulauskas, V., & Paulauskas, D. (2013). Evaluating the width of navigational channels. *Transport*, 28(2), 166–174. <http://doi.org/10.3846/16484142.2013.802746>

Paulauskas, V., Paulauskas, D., & Plačienė, B. (2002). The analysis of possibilities to enter the ports of the Baltic sea for big container ships. *Transport*, 17(2), 66–70. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16483480.2002.10414014>

Paulauskas, V., Paulauskas, D., Plačienė, B., & Lukauskas, V. (2016). Optimize width of navigational channels and ships turning basins in ports. *Transport*, 31(1), 70–75. <http://doi.org/10.3846/16484142.2015.1060632>

Prof, A., Brock, S., Member, I., & Gniadek, E. M. Analysis of input shaping and PID-controller interaction structures for two-mass systems. *Control and Information Engineering*, 281(1–2), 1–20.

Qian, D., Tong, S., & Lee, S. (2016). Fuzzy-Logic-based control of payloads subjected to double-pendulum motion in overhead cranes. *Automation in Construction*, 65, 133–143. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.014>

Ranjbari, L., & Shirdel, A. H. (2015). Designing precision fuzzy controller for load swing of an overhead crane. <http://doi.org/10.1007/s00521-015-1825-z>

Rew, K. H., Ha, C. W., & Kim, Y. S. (2009). A practically efficient method for motion control based on asymmetric velocity profile. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(7–8), 678–682. <http://doi.org/DOI 10.1016/j.ijmactools.2009.01.008>

Roso, V., Woxenius, J., & Lumsden, K. (2009). The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. *Journal of Transport Geography*, 17(5), 338–345. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008>

Sano, H., Ohishi, K., Kaneko, T., & Mine, H. (2010). Anti-sway crane control based on dual state observer with jutikliniu-delay correction. *2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 679–684. <http://doi.org/10.1109/AMC.2010.5464050>

Sarac, V., & Cvetkovski, G. (2013). Transient Analysis of Induction Motor Using Different Simulation Models, 6(1), 65–75.

Schaub, H. (2008). Rate-based ship-mounted crane payload pendulation control system. *Control Engineering Practice*, 16(1), 132–145. <http://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.04.011>

Sivilevičius, H. (2011). Modelling the interaction of transport system elements. *Transport*, 26(1), 20–34. <http://doi.org/10.3846/16484142.2011.560366>

Slater, R. D., Sc, B., Wood, W. S., Ph, D., & Eng, C. (1967). Constant-velocity solutions applied to the evaluation of induction-motor transient torque peaks. *The institution of electrical engineers*, 114(10), 1429–1435.

Smoczek, J. (2014). Fuzzy crane control with jutikliniuless payload deflection feedback for vibration reduction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 46(1), 70–81. <http://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.12.012>

- Sorensen, K., Fisch, H., Dickerson, S. L., Singhose, W. E., & Glauser, U. (2008). *A multi-operational-mode anti-sway and positioning control for an industrial bridge crane*. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (T. 17). IFAC. <http://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.3834>
- Stoychitch, M. (2013). An Algorithm of Linear Velocity Control of a Stepper Motor in Real Time. *Annals of the Faculty of Engineering*, 11(3), 51–56.
- Sun, N., Fang, Y., Member, S., Zhang, X., & Yuan, Y. (2011). Phase Plane Analysis Based Motion Planning for Underactuated Overhead Cranes. *International Conference on Robotics and Automation*, 3483–3488.
- Sun, N., Zhang, X., Fang, Y., & Yuan, Y. (2012). Transportation task-oriented trajectory planning for underactuated overhead cranes using geometric analysis. *IET Control Theory & Applications*, 6(10), 1410–1423. <http://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0587>
- Sun, Z., Wang, N., Bi, Y., & Zhao, J. (2015). A DE based PID controller for two dimensional overhead crane. *Chinese Control Conference*, (1), 2546–2550.
- Tanaka, Y., Konishi, Y., Araki, N., & Ishigaki, H. (2008). Control of container crane by binary input using Mixed Logical Dynamical system. *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, 13–17. <http://doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694521>
- Tanaka, Y., Konishi, Y., Araki, N., Sato, T., & Ishigaki, H. (2009). Development of High Velocity Controller of Container Crane by Binary Input Using Mixed Logical Dynamical System. *2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, 181–184. <http://doi.org/10.1109/ICICIC.2009.175>
- Ting, S. L., Wang, L. X., & Ip, W. H. (2012). A study of RFID adoption for vehicle tracking in a container terminal. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(1), 22–52.
- Tomczyk, J., Cink, J., & Kosucki, A. (2014). Dynamics of an overhead crane under a wind disturbance condition. *Automation in Construction*, 42, 100–111. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.013>
- Tsamboulas, D., Vrenken, H., & Lekka, A.-M. (2007). Assessment of a transport policy potential for intermodal mode shift on a European scale. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(8), 715–733. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2006.12.003>
- Tuan, L. A., Lee, S.-G., Nho, L. C., & Kim, D. H. (2013). Model reference adaptive sliding mode control for three dimensional overhead cranes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(8), 1329–1338. <http://doi.org/10.1007/s12541-013-0180-1>
- Vasiliauskas, A. V., & Barysiene, J. (2008). An economic evaluation model of the logistic system based on container transportation. *Transport*, 23(4), 311–315. <http://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.311-315>
- Vaughan, J., Yoo, J., Knight, N., & Singhose, W. (2013). Multi-Input Shaping Control for Multi-Hoist Cranes. *American Control Conference (ACC)*, 3455–3460.

Vázquez, C., Collado, J., & Fridman, L. (2014). Super twisting control of a parametrically excited overhead crane. *Journal of the Franklin Institute*, 351, 2283–2298. <http://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2013.02.011>

Wang, Y. W. Y., Ru, Y. R. Y., Jia, T. J. T., Chen, Q. C. Q., & Wang, M. W. M. Research on the standardization of container transportation based on integration in China, 22008 *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics (2008)*. <http://doi.org/10.1109/SOLI.2008.4683034>

Wang, L., Zhang, H., & Kong, Z. (2015). Anti-swing Control of Overhead Crane Based on Double Fuzzy Controllers. *Control Engineering*, 981–986.

Wilmsmeier, G., Monios, J., & Lambert, B. (2011). The directional development of intermodal freight corridors in relation to inland terminals. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1379–1386. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.07.010>

Wong, T. T., Tang, C. H. H., & Mailah, M. (2012a). Robust active heave compensated winch-driven overhead crane system for load transfer in marine operation. *ICIAS 2012 – 2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems: A Conference of World Engineering, Science and Technology Congress (ESTCON) – Conference Proceedings, 1*, 111–116. <http://doi.org/10.1109/ICIAS.2012.6306170>

Wong, T. T., Tang, C. H. H., & Mailah, M. (2012b). Winch driven active heave compensation for load transfer in overhead crane system. *ICIAS 2012 – 2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems: A Conference of World Engineering, Science and Technology Congress (ESTCON) – Conference Proceedings, 1*, 34–39. <http://doi.org/10.1109/ICIAS.2012.6306154>

Wu, T.-S., Karkoub, M., Yu, W.-S., Chen, C.-T., Her, M.-G., & Wu, K.-W. (2016). Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control. *Fuzzy Sets and Systems*, 290, 118–137. <http://doi.org/10.1016/j.fss.2015.01.010>

Wu, W., Liu, Z., Chen, M., Yang, X., & He, X. (2012). An automated vision system for container-code recognition. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2842–2855. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.143>

Wu, Z., & Xia, X. (2014). Optimal motion planning for overhead cranes. *IET Control Theory and Applications*, (January), 1–25. <http://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.0069>

X., L. (2013). The application research of RFID in container terminal security. *2nd International Conference on Transportation Information and Safety: Improving Multimodal Transportation Systems – Information, Safety, and Integration, ICTIS 2013* (p. 1981–1986). Gauta <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84887327322&partnerID=40&md5=f9d7d320024e18a880fe2bfd43a4501a>

Xu, W., Gu, W., Shen, A., Chu, J., & Niu, W. (2011). Anti-swing control of a new container crane with fuzzy uncertainties compensation. *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, 1648–1655. <http://doi.org/10.1109/FUZZY.2011.6007646>

Xuebo, Z., Yongchun, F., Ning, S. U. N., & Mingwei, S. U. N. (s.a.). A Pseudospectral Time-Optimal Motion Planner for Underactuated Overhead Crane Systems. *Expert Systems with Applications*, (3), 4397–4402.

Zhang, J., Zhao, D., Yi, J., & Yu, Y. (2008). Modeling of a Rope-Driven Self-Levelling Crane. *2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control* (p. 489–489). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICICIC.2008.370>

Zhang, X., Yi, J., Zhao, D., & Yang, G. (2007). Modelling and Control of a Self-Levelling Crane. *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, (September), 2922–2927. <http://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4304024>

Zhi-jun, L. I., Zhen, L. I., Hui-jie, L. I., Ye, Z., Cheng, S., & Yan, S. U. N. (2012). Research of Coordinated Control Method of Hybrid Power Crane System. *International Conference on Modelling, Identification and Control*, 1093–1097.

Zrnić, N., Oguamanam, D., & Bošnjak, S. (2006). Dynamics and modelling of mega quayside container cranes. *Journal of Industrial Engineering and Management*,, 193–198.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Andziulis, A., Eglynas, T., Bogdevičius, M., Jusis M., Senulis, A. (2016). Multibody dynamic simulation and transient analysis of quay crane spreader and lifting mechanism. *Advances in Mechanical Engineering*. London: SAGE publications Ltd. ISSN 1687-8132. Vol. 8, no. 9, p. [1–11]. Web of Science. [Citav. rod.: 0,640(F) (2015)].

Eglynas, T., Bogdevičius, M., Andziulis, A., Lenkauskas, T. (2015). Overview of crane control systems and the related problems: analysis of container oscillation using different types of cargoes. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Mechanika, medžiagų inžinerija ir pramonės inžinerija = Science – future of Lithuania: Mechanics, material science and industrial engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 7, Nr. 6, p. 642–648.

Andziulis, A., Eglynas, T., Bogdevičius, M., Lenkauskas, T., Jusis, M. (2016). Development of an adaptive intermodal container handling control subsystem based on automatic recognition algorithms. *European International Journal of Science and Technology (EIJST)*. Newcastle: Center for Enhancing Knowledge. ISSN 2304-9693. Vol. 5, no. 3, p. 21–28.

Straipsniai kituose leidiniuose

Ruibys, K., Andziulis, A., Eglynas, T., Jusis, M., Drungilas, D., Gaigals, G. (2013). Development of distributed real time data acquisition system for radio telescope monitoring. *Space research review. Ventspils: Ventspils university college*, ISBN 9789984648330. Vol. 2 , p. 34–41.

Eglynas, T., Bogdevičius, M., Jakovlev, S., Andziulis, A., Lenkauskas, T., Harja, J.; Drungilas, D. (2012). Color segmentation based rails recognition system for autonomous train velocity correction in an intelligent transport control. *Transport Means – 2012: proceedings of the 16th international conference*, October 25–26, 2012, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas: Technologija, ISSN 1822-296X. p. 171–174.

Eglynas, T., Jakovlev, S., Bogdevičius, M., Didžiokas, R., Andziulis, A., Lenkauskas, T. (2013). Concept of cargo security assurance in an intermodal transportation. *The 10th Jubilee International Conference on Marine navigation and Safety of Sea transportation: Maritime transport and shipping*. 19–21 June, Gdynia, Poland. Leiden: CRC Press, ISBN 9781138001053. p. 223–226.

Eglynas, T., Bogdevičius, M., Lenkauskas, T., Andziulis, A. (2013). Dynamic modelling of quayside crane drive mechanism for improving container transportation process. *TRANSBALTICA 2013: the 8th International Conference May 9–10, 2013, Vilnius*, Lithuania : selected papers Vilnius: Technika, ISSN 2029-2376, ISBN 9786094574702. p. 32–37.

Eglynas, T., Jusis, M., Lenkauskas, T. (2013). Gdanskio uosto krovinių srautų prognozavimo modelio kūrimas. *Jūros ir krantų tyrimai – 2013: 7-oji nacionalinė jūros mokslų ir technologijų konferencija: konferencijos medžiaga*. Klaipėda: Klaipėdos universitetas, ISBN 9879986313793. p. 73–76.

Lenkauskas, T., Gerasimov, K., Tekutov, J., Eglynas, T. (2013). Goteborgo uosto krovinių srautų prognozavimo modelio kūrimas. *Jūros ir krantų tyrimai – 2013: 7-oji nacionalinė jūros mokslų ir technologijų konferencija: konferencijos medžiaga*. Klaipėda: Klaipėdos universitetas, ISBN 9879986313793. p. 143–145.

Eglynas, T., Jakovlev, S., Bogdevičius, M., Andziulis, A., Lenkauskas, T., Drungilas, D., Tekutov, J., Ruibys, K. (2014). Matematinio modeliu grindžiamos intermodalinio konteinerių terminalo krovos mazgo išmaniosios valdymo sistemos kūrimas. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje. [D.] IX*. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla. ISSN 1822-4652. p. 63–68.

Kiseliovas, E., Glazko, V., Eglynas, T., Bogdevičius, M., Nikitin, V., (2014). Intermodalinio krantinės kranų modelio automatizavimas ir pozicionavimo algoritmo kūrimas panaudojant ATmega128A mikrovaldiklį. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje. [D.] IX*. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla, ISSN 1822-4652. p. 109–113.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The container and its cargo must be transported safely and rapidly. Maximum overload happens in marine intermodal cargo terminals and other associated logistical chains. Strong wind swing the ship and quay crane ropes that support container spreader, along with any human factors when the operator is too slow to react to the swinging container, which leads to the risk container damage and promotes the operator to slow the shore-to-ship loading procedures or reverses the process. There are systems already developed for smart containers, which enable RFID technology to transmit information about the particular cargo to perform operations faster.

Therefore, transport science is necessary to create a new intelligent quay crane concept, new mathematical mechanisms and control algorithms to implement a system for advanced control of quay crane spreaders to safely handle individual fastest loading mode. Overall fluctuations would be taken into account in the mathematical system consisting of real-time wind data and crane machines systemic specifics. Rich logic or PID fluctuations suppressing control systems for real cranes are difficult to apply because of the container spreader movements, therefore, in order to increase the efficiency of cargo handling cranes autonomy, a new container fluctuations control system must be developed.

The main problem that has to be resolved – increase of the cargo handling machines effectiveness and its diversification, to build container handling control algorithms and

handling techniques that accelerate the secure container handling by reducing its transportation fluctuations, thereby increasing the security.

Relevance of the Thesis

Today Klaipėda port gets 9 000 TEU (1 TEU = 38.5 m³) capacity container ships. After the reconstruction of the port greater ships with > 20 000 TEU capacity will be welcomed. Therefore, it is important to the national science to create new technologies, in a fastest way to reboot the continuous cycle of loading operations. It becomes crucial to automate quay cranes that still remain controlled operators in European declared fully autonomous ports. Known quay crane automation methods are not universal, their application is tricky, logic operators or algorithms described in the model are not possible without the development of new systems and mathematical models in the form of programming problems. Therefore, this is a type of engineering challenge, where container ships bring tens of thousands of containers at a single port, and a lot of data is being generated. This is a big data analysis problem that is vital and it is relevant to use special algorithms to increase computer performance and to extract new optimization methods that allow the efficient solution of complex control systems optimization tasks in completely autonomous terminal. Knowing that the controlled objects have different properties: static or dynamic, different parameters, stationary and non-stationary characteristics for fusion algorithms adapted to one or another class of problems; it is possible to generate a unique standardized synthesis algorithm to optimize performance that depends not only on quality, but also on fusion options. These tasks are programmed as popular classical optimizations methods, when it is possible to deal with the controlled objects using simplified mathematical models and differential equations.

The Object of Research

The object of research is the transshipment of container, both fast and secure, from big container (> 9 000 of TEU) to container couriers on shore, by developing and implementing autonomous cranes and the concepts of smart shipping containers in a “green” port.

The Aim of the Thesis

To develop a smart marine container “ship-shore-ship” transshipment in the “green corridor” node quay crane control system prototype with an algorithm that generates specific container loading velocity change projections realized with PID controller with integrated fluctuations suppression function to velocity up the loading process.

The Tasks of the Thesis

So that to reach the aim of the thesis, the following tasks are formed:

1. To perform scientific analysis of literature associated with the “Green Port”, “Autonomous quay crane” and “Intelligent container” concepts in an autonomous port and to compare known quay cranes control algorithms advantages and their performance in the overload cycle. To analyze the control techniques and algorithms used with different profiles for operations velocity control and PID controller applications to realize technological modes.

2. To create a differential equations mathematical model which is necessary for the programming of the crane trolley velocity profiles to determine the load oscillations amplitude with stabilization time and the overall transportation cycle and which describes quay crane mechanical processes for the simulation of dynamic load, during the period of container transshipment.
3. To create autonomous quay crane for container handling laboratory prototype system with smart algorithms to confirm experimentally the theoretical assumptions.
4. To perform comparative studies proving that the calculations, the developed intelligent control algorithm and the proposed container fluctuations control system are more efficient and faster than other known examples. To test the performance of the developed intelligent control system through experiment, by adapting different velocity variation profile and the PID controller parameters to individual containers.

Research Methodology

The following methods are used in the dissertation:

- classification, allowing to define and understand the subject, collectively analyze the literature and data peculiarities, advantages and disadvantages;
- theoretical (analysis and synthesis) allows you to select problem solution search strategy;
- intuition, allowing to identify the problems raised by using intuition and experience;
- experimental allowing to test hypothesis;
- statistics for assessing the statistical significance of the findings.

Scientific Novelty of the Thesis

One of the major emerging “green corridor” framework tasks is container handling from ship to quay, which is solved by generating three concepts (autonomous terminal, autonomous quay crane and intelligent container).

- Designed marine intermodal terminal quay crane mathematical model working as a nonlinear dynamical system that helps to determine the dynamic characteristics of most important data while increasing the safety and stabilization of transport and overall container overload cycle.
- Development of smart marine container concept, which provides additional information on the container and the resulting loads, adapted to the service provider's needs, a new integrated autonomous quay crane control algorithm with the proposed embedded container fluctuations

control sub-program, which allows the control system to use the velocity variation profiles and PID controllers.

- Designed laboratory quay crane control system smart prototype that allows through experiments to verify the theoretical findings and to find an optimal control solution in dynamic crane environmental regime to reduce congestion cycle.
- It is shown that such experimentally tested technology becomes intelligent control algorithms based on assessing a particular container handling, planning and decision-making specifics in order to velocity up the autonomous loading process.

Practical Significance of Achieved Results

It is possible to create a continuous container congestion, while preserving human resources, by installing the proposed three concepts (autonomous terminal, quay crane and intelligent container) in the National port. Knowing that saving even a few seconds from one container transshipment out of 10, 000 TEU it is possible to minimize expensive downtime.

The results could be used in various types of crane control systems design or modernization. Especially in the development of new control algorithms, in order to increase the load fluctuation compensation chain efficiency for the overall crane control system, according to the attenuation and assessment of each individual container, it is possible to achieve a similar attenuation throughout all transportation cases. Received individualized transportation performance results may be useful in the development of adaptive control algorithms, which are particularly relevant load parameters and characteristics are known.

The Defended Statements

1. It is necessary to analyze different container handling and cargo overload modes for “ship-shore-ship” cycle mode to ensure safety by creating smart autonomous quay crane’s control system algorithm and a laboratory prototype of the quay crane, which allows examination in order to determine and verify the optimal control parameters, which could improve load cycle up to 8 percent.
2. In order to reduce the duration of individual container handling procedures and increase the handling safety, a methodology must be developed enabling to use smart marine container provided information to customize the load cycle integrating S form velocity profile.
3. It is effective to use modern control technology-based control algorithms to accelerate the loading process in autonomous container terminal. Which is capable of generating specific cargo loading regimes and suppress individual container swinging during loading cycle using additional control loop and therefor increasing the loading capacity.

Approval of the Results

Topic of the dissertation was printed in 11 publications: one in a scientific journal, included in the Thomson ISI list (2016); two in reviewed periodical scientific journals (2012–2016 years), four in reviewed international conference materials (2012–2013 years), four in other international and national conference proceedings (2012–2015 year).

The dissertation research results have been published in nine scientific conferences in Lithuania and abroad:

- Young Scientists Conference “Technology scientific works in Western Lithuania” for 2012–2014. Klaipeda;
- National Marine Science and Technology Conference “Marine and coastal research” – 2013 in Klaipeda;
- International Conference “TRANSBALTICA 2013” in Vilnius;
- International Conference on “Transport Means – 2012” in Kaunas;
- International Conference on “The 10th Jubilee International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2013”. Gdynia, Poland.

Structure of the Dissertation

The thesis comprises an introduction, three chapters with summarized results, general conclusions, list of literature, scientific publications of the author on the topic of dissertation, summary in English and the three annexes.

The volume of the thesis amounts to 142 pages with the exception of annexes; the text contains 51 numbered equations, 77 illustrations and 9 tables. The dissertation is built upon 78 references.

1. The review quay crane control systems and cargo technologies

This chapter describes well known mathematical models and system control algorithms of ship quay cargo loading process. Also the main scientific research directions and trends are described, which are related to design of rapid and safe quay cranes for autonomous intermodal loading of containers for sea terminal. The scientific literature analysis is related to the aim of dissertation, which is to design the individualized cargo loading technology.

In this chapter, the analysis of dissertation related scientific literature gives the view on relative nowadays problems. The chapter presents development trends of green port in perspective to the future of port and green transport corridor’s design aspects. In addition, the smart ship concept with containing information interchanging containers is described. The chapter contains information about the challenges of usage of RFID and 3D scanning technologies in cargo loading process and container information transfer to the quay. The analysis of scientific literature and results of scientific research gave the problem set of cargo loading – safety, insufficient cargo loading velocity, which does not satisfies nowadays cargo loading volume, energy wasting, the lacks and drawbacks of control algorithms, not fully automatic and autonomous control. All mentioned problems not only creates many technical but also economic challenges for container transporting and cargo

loading implementing companies. To implement the safety and velocity upgrade scientists propose different methods such as optimization of quay crane's control algorithms for loading of containers, analysis of separate cargo loading operations and their correction, optimization of trajectory, the reduction measures of container sway and others. Other main research direction is the reduction of container sway during the transportation process. The sway of the container is caused by different causes – wind gust, uneven rail surface, the actions of operators, sway of the ship, and the movement of the crane, non-monotonous start up, electrical drive work and other additional causes. The analysis of the overviewed scientific works on the topic of increasing cargo loading velocity measures are related to the control methods and algorithms of the cranes. These works present trolley as a main control object, which is positioned in such a way that the sway of the cable hanged container would be reduced. Due to the high velocity of the trolley, there is a difficulty to position the cargo to the transportation site at the end of movement. Therefore the container sway problem is very relevant. In addition, the literature review contains the analysis of the trolley's velocity profiles. The most popular and used of velocity profiles is trapezoidal, but in recent years, the S-shaped velocity profile is used more frequently. This profile allows to control acceleration the start-up and stoppage of the trolley more smoothly.

There are many proposed methods in scientific research results dedicated to optimize the container loading process, control algorithms and measures – 3D models, which are used in model crane's trolley mechanism movements for the research purposes. In this case, the PID controller is used for the positioning of the trolley and PD controller for suppressing the sway of container. However, the main problem, which occurs for the scientists for the PID controller, is the tuning of the controller parameters. The traditional methods for determining the PID controller parameters such as test and error method is the simplest, but parameters determined this way do not provide the effective results.

As a conclusion it could be said that in nowadays scientific researches one of the main relative problems is the optimization of container loading velocity using the existing loading infrastructure. This problem is related with aiming of the reduction of container sway using closed loop control system with several feedbacks and still developing estimation of PID controller parameters for different variations of control loops for container loading processes.

2. The concept of distributed control and dynamic modeling of the quay crane

This chapter describes virtual modeling and design process of quay crane, provides the control system model of quay crane and description of performed experiments. The main components of the designed quay crane model is presented and the functionality of the systems was investigated performing virtual modeling including the oscillations of the cargo. According to the experiment and virtual modeling results, the functioning laboratory quay crane was created with the adapted and implemented control hardware and software equipment. In addition, the block diagrams of control components and algorithm were presented. According to the calculations of the 1st and 2nd chapter and taking into account the recommendation of other scientists the computerized control model was cre-

ated which was used for the estimation of PID controller parameters. In chapter the influence of different PID control parameters to the sway of the container were estimated. The experimental research was performed evaluating different parameters of the container and different control techniques to perform the full testing of the control system’s effectiveness and evaluate the container sway response in different mentioned conditions. Using these conditions a shipment process can be simulated in a virtual environment using several different algorithms before its real life shipment. This step will help to select the best algorithm for shipment and cargo safety level will be very high. In Figure S2.1, a concept of such control system is displayed.

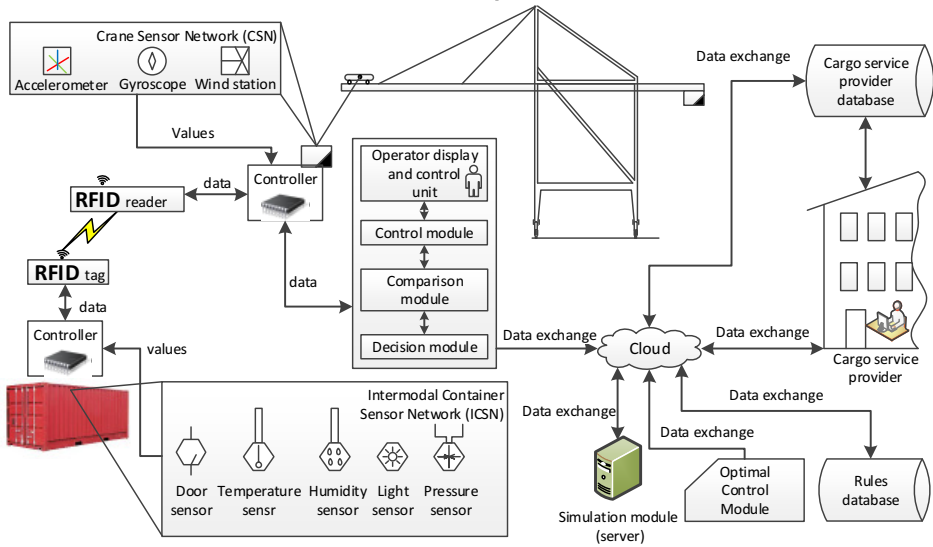


Fig. S2.1. The concept of disturbed dynamic control model based on sensor network and optimal control

This concept is based on distributed control architecture. Besides the control system, a sensor network and data exchange system based on cloud computing are planned. A sensor network connects two objects: sensor built into the container and sensor monitoring a crane’s behavior. Three main sensor of a quayside crane are considered: accelerometer, gyroscope and a wind station. The whole sensor network of the crane is for monitoring operation and data collection purposes. All of the data is sent in real time to certain modules, where further data processing takes place. One of these modules is the optimal control module. This module checks if the cargo is moving in the correct trajectory. It is done by updating the cargo coordinates at certain time intervals. For every moment calculations are done separately.

Most of the overviewed crane dynamic models are simplified laboratory prototypes such as in (Iru, 2014; Maneeratanaporn & Murakami, 2012; Pan *et al.*, 2011; Tuan, Lee,

Nho, & Kim, 2013; Vázquez, Collado, & Fridman, 2014) where not taken into consideration are external factors, such as human actions, wind gusts, trolley and spreader movements or motor transient and vibrations. This allows to make the right decisions in the analysis stage and propose a relevant solutions as a result. In our case for theoretical model verification we need to include trolley and spreader movements, motor transient and vibrations. A three dimensional model of a typical quay crane is developed, that takes into consideration the rigid body dynamics of the payload. According to this system, the trolley moving along the Y axis, including other model part's movement and vibrations transmitted. To validate the dynamics model and numerical simulations as mentioned, the laboratory scaled prototype was created and practical experiment has been carried out. For the ease of comprehension, the overall system is shown in conceptual model of prototype and experiment situation as shown in Fig. S2.2. An evaluation of the model's correctness is conducted using analysis of the crane spreader acceleration. The calculated spreader horizontal accelerations from numerical simulation were compared with those registered during the experimental measurements.

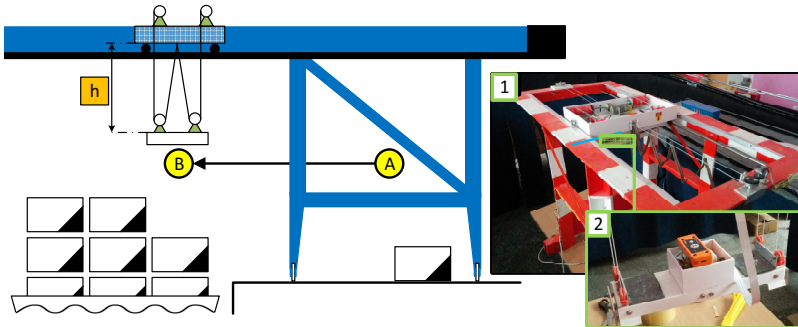


Fig. S2.2. Laboratory scaled prototype of quay crane and experimental situation (1 – scaled prototype, 2 – sensors and data acquisition system, mounted on top of spreader)

The simulation was implemented for the representing operational case in which the trolley simultaneously operated. The trolley is driven to move from its initial position A to B. The empty spreader suspended cables are initially lowered from the top position ($h = 0.32$ m). The system has two degrees of freedom that are the displacement of the trolley in X direction, the suspended load's swing angle. On the other hand, for the input, an X direction force drives the trolley. The parameters of this real crane prototype as shown in Table 1 are used as a basis for the experiments presented in this paper.

The mathematical simulation on Matlab version R2011b (7.13.0.564) was done for the laboratory quay crane trolley and spreader powered by stepper electrical motor controlled by elementary trolley control functions. After the performance of theoretical calculation and analysis of quay crane dynamic processes the same case was performed and in the laboratory prototype. The aim of the practical experiment was to determine the natural oscillations of the spreader and oscillations, which are caused by, previously described cases. The results of the experiment are only presented for the case when the spreader moves with constant velocity. The main goal was to propose a mathematical model for the

crane spreader and trolley, significantly closer to the laboratory scaled model, and to validate it with experimental measurements. The results are shown in Figure S2.3. During the numerical simulation, the acceleration data of Y axis is obtained for experimental comparison. The theoretical results show that crane spreader accelerations amplitude varies about 0.35 m/s^2 with a period of about 1.2 s. Also during numerical simulation, the influence of different lengths of ropes on cargo oscillation is investigated. This research cannot be done on laboratory scaled prototype because of construction limitations.

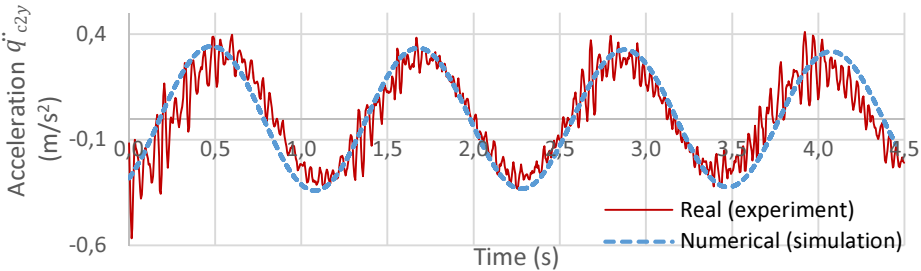


Fig. S2.3. Comparison of mathematical and experimental results

After theoretical investigation of the crane dynamics processes the same case was implemented to the real scaled laboratory prototype. The task of the experiments was the identification of the crane prototype natural frequencies and their variation with cases described above. The MIDE data acquisition stick was mounted on the top of spreader bar (shown in Fig S2.2 part 2). We compare numerical simulation and experimental measurements results to validate theoretical model. Numerical simulation results are marked as dashed line and experimental measurements as continue line. For full validation of theoretical model, we also perform the spectral analysis (Fig. S2.4).

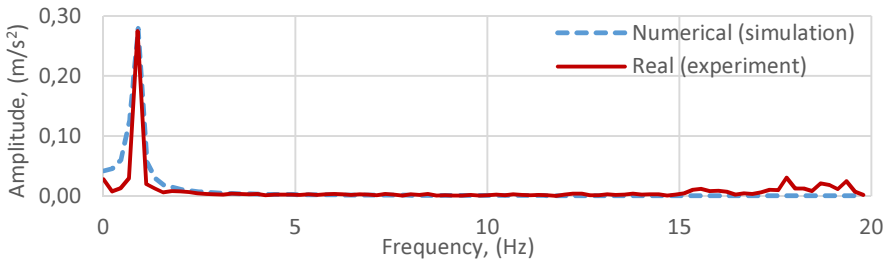


Fig. S2.4. Comparison of mathematical and experimental spectrums

The analysis of the spectrum shows that the experiment measurements and numerical simulation results matches. We can see that low frequency oscillations runs at 0.89 Hz. Also during experimental measurement high frequency, oscillations are observed. Fig-

ure S2.4, shows that the spectrums of numerical simulation and the experimental measurement are similar at the low frequency interval. The small differences are at 0–0.5 Hz and 15–20 Hz between real measurements and numeral simulation results. These differences exists because we do not evaluate whole crane construction in the model. In real case the vibrations caused by motor, has impact for measurements. High frequency peaks probably is the natural sensor noise. We draw the conclusion that the developed quay crane spreader and trolley numerical model with its parameters of construction sufficiently represent the results of the experimental research.

The most of the previously implemented models by other scientists are solving problems related to their work such as – sway of the cargo or container in exact situations (Maneeratanaporn & Murakami, 2012; Z. N. Masoud, 2005; Ziyad N. Masoud, 2009; Ranjbari & Shirdel, 2015), the sway caused by wind, the influence of the sway to the cargo loading process (Tomczyk *et al.*, 2014) and etc. Models presented in most of these works are for one time limited usage. The mathematical model presented in this dissertation is unique because it can be used and adapted for various dynamic and complex problem solving in container transportation process. The presented model consist of the hoist steel rope system, were the spreader and trolley are connected with eight steel rope system. In addition, the model takes into account the elastic properties of the steel ropes and the electrical motors with their transient behavior.

Taking into account the result of experiments of performed on small scale laboratory quay crane's prototype and the known information (dimensions, masses etc.) about the parameters of spreader and trolley during the comparative investigation it can be stated that theoretical simulation results are verified and can be trusted. This approval gives possibility to use the model in further work to design the control algorithms dedicated for the reach of autonomous work of the quay crane used for cargo loading. The acquired results show that the mathematical model of quay crane is totally functioning and all parts of it are adequate to the laboratory prototype.

The results of performed analysis are useful for the further work to develop the control algorithm which leads to the reductions of the sway of container during transportation. Also in further work, it is foreseen to analyze more internationally widely proposed different control methods, their parameters and technique combinations to achieve better cargo loading performance and better safety.

3. Design and development the intermodal quay crane prototype, control and handling efficiently analysis

This chapter describes the virtual quay crane modeling and creation process, the control system model and the experimental studies. Key components of the experimental quay crane model are described, and virtual simulation was performed to define system functionality, assessing the load fluctuations. According to the 1st chapter analysis and 2nd chapter calculations and taking into account other recommendations from the scientific community, a computer control model was created, which is used to determine the PID controller components. Computer modeling and simulation was done using computer-aided design (CAD) and simulation program “SolidWorks” 2014, with plugin “Geartrax” 2014. The simulation was performed to determine whether all the crane components are connected so that the systems function properly. In the simulation, some parameters are

not taken into account. The obtained results of simulation when the velocity profiles was applied are presented in figure S3.1.

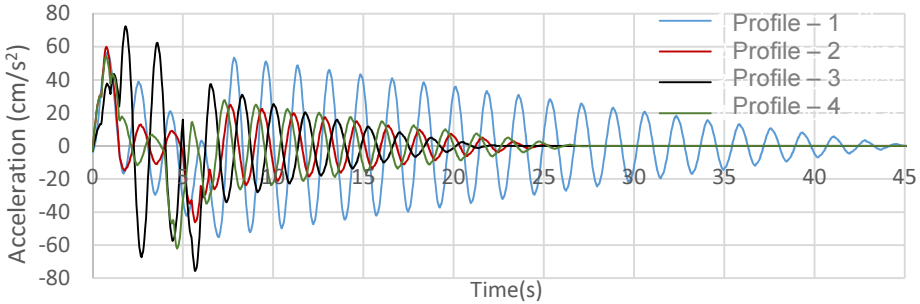


Fig. S3.1. Simulation results comparison (different velocity profiles)

All the obtained results represent the fluctuations of the container on the Y axis. It can be concluded that the results confirm problems discussed in Chapter 1, which states that the maximum fluctuations are mostly influenced by the trolley movement acceleration and velocity profile. In all tests the maximum oscillation amplitude of transportation reached at the beginning, but ceases to fluctuate fastest, when container was transported using the 3rd velocity profile. Pictures of developed laboratory scaled quay crane are presented in annexes B. This laboratory prototype main structure presented in figure S3.2.

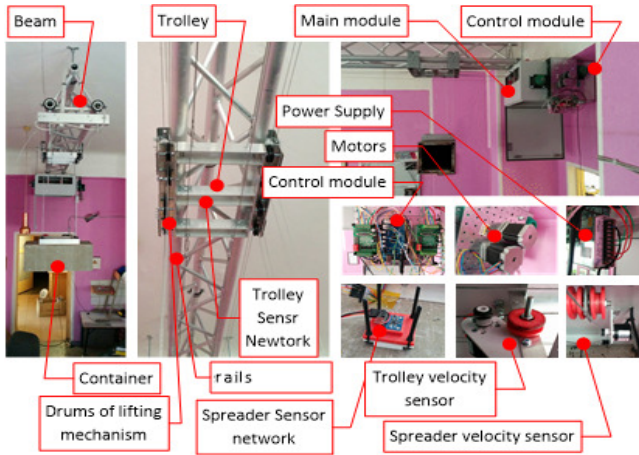


Fig. S3.2. The main system components of quay crane prototype

Virtual quay crane hoist and gripper systems testing were performed and laboratory prototype experimental research was developed. In the next stage modeled quay crane control system was designed using Matlab Simulink simulation tool, where the S-shaped velocity profile was chosen for control system input.

In order to compare the experimental results based on S-shaped velocity profile and trapezoidal velocity profile, the mathematical calculations was performed, to establish similar conditions for experiment. Both profiles are calculated and compared. By the initial selectable input of the acceleration and deceleration duration for Y axis $t_{acc} = 4$ seconds. The state machine diagram based on trapezoidal motion profile has fourth main states, Different from trapezoidal based state machine diagram, S-shaped profile, has eight main states, where the stop and move states are same as in later are. Other phases are based on jerk control. Depending on current phase, jerk can be positive, negative or zero.

During the handling, firstly Z axis motor was switched on. The acceleration lasts 2 seconds. The oscillation by Y axis, slightly increases, but it's not affected the appearance of the residual oscillation. When the Y axis motor was turned on, at about 15 seconds the acceleration (Phase I) was started. At this moment the container oscillation suddenly increases. In Trapezoidal profile case, Y axis activation influences residual oscillation which lasts for the long time period even after the transportation process ended, contrary to S-shaped profile, where at the phase III the oscillation was slightly damped, but during the phase VII, induced again.

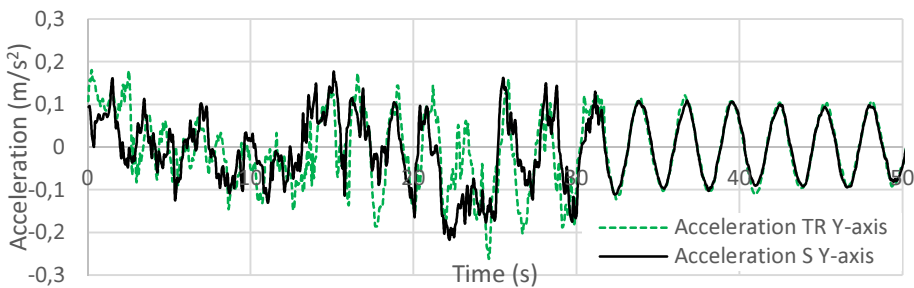


Fig. S3.3. Cargo oscillation comparison using trapezoidal and S-shaped velocity profile

Comparing the oscillation dependency from Y axis velocity in both cases (Fig. 3.3), the residual oscillation after transportation process are similar. A complicated crane system where the cargo are suspended by cables, may cause the results. The scientific Keun-Ho Rew (Rew *et al.* 2009) S-shaped velocity profile applied to the robot manipulator to control a rigid beam which is made of stainless steel. In our case, S-shaped velocity profile applied to quay crane spreader to control the oscillation of cargo which is flexible connected by cables. The smoothness of trolley was improved as well as Keun Ho Rew (Rew *et al.* 2009), however the residual oscillation still remains.

This Simulink mathematical model was set up to determine the PID controller. The first simulation experiment was carried out without the feedbacks (crane trolley velocity and load variations in the linear velocity). In the initial phase, the PID controller parameters were determined, when there was only crane trolley linear velocity feedback. The Following data is provided – minimum square errors deviation was determined in the second phase, but this is explained by the fact that the needed velocity of (0.2 m/s) was not reached and consequently, the increasing proportion of the variation coefficient K_p decreases.

Therefore, by increasing K_p this deviation decreases. For other search, $K_p = 0.25$ value was selected and the integration factor for the PID controller will be determined.

When there is only one feedback, the following PID controller parameters $K_p = 0.6$, $K_i = 13$ and $K_d = 0.01$. According to the results, it was found that the reduction of load fluctuations in the intensity of the additional PI system only proportional to the regulator greater error, because the deviation integral ratio increased with the increase of PI K_p factor. Based on modeling results the following PID and PI ratios were chosen – PID: $K_p = 0.6$, $K_i = 13$ and $K_d = 0.01$, and an additional PI controller: $K_p = 0.2$, $K_i = 2$. The 7th test was selected, because at that moment the trolley integral square deviation is the smallest in PID and PI control system. I was decided to control the velocity, respectively, control solutions change as well, adapted to the control of the crane. The following figure S3.4 shows the principal control algorithm scheme.

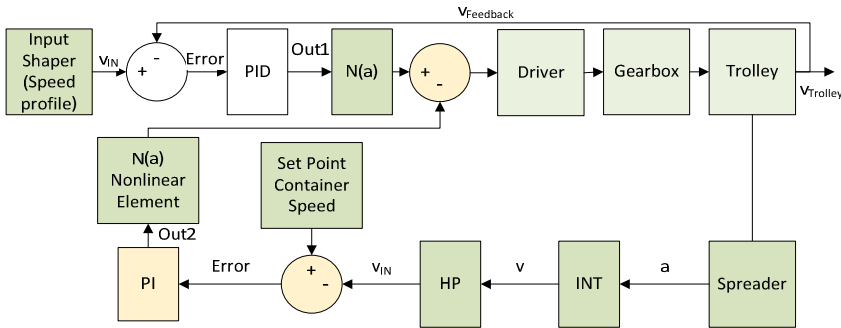


Fig. S3.4. The block diagram of control algorithm

White blocks in the control algorithm flow diagram represent elements used also by other scientists, orange are modified elements and greenish color – new or based on other scientists, green color – developed elements. In order to replicate as closely as possible the situation where due to the external impact fluctuations occurs, it was decided to simulate the physical contact of the container with another container and oscillations occur. The experimental results are presented in Figure S3.5.

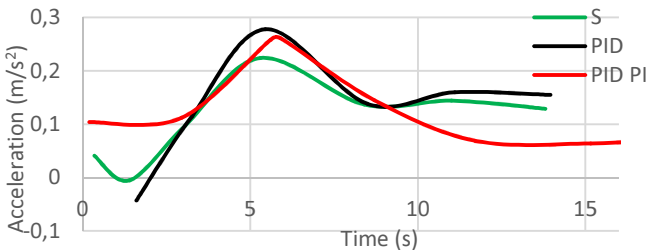


Fig. S3.5. Experimental results –oscillation extremums (S-control using “S” shaped velocity profile only, PID – control using PID with “S”-shaped velocity profile, PID PI – control using full developed algorithm with compensation feedback)

The obtained results show that the S-shaped variation of velocity profile gives virtually identical results as with the PID controller. However it can be seen that at 13 seconds the PID controller travels same distance faster. With these control techniques additional fluctuations appear. PID PI controller causes significantly smaller fluctuations. Because of the compensation chain oscillation is suppressed more effectively. Computational study suggests, that the damping ratio with S-shaped variation of velocity case is 0.21, the PID controller with an S-shaped variation of velocity profile is – 0.22, and the PID PI – 0.66, which is up to 66% more effective in comparison with previous control techniques. In addition, experimental research was carried out in an empty and full container, with transports liquids and unstable loads. Three flaxes were selected – 1 meter, 1.9 meters and 2.3 meters long. Decay rates were obtained in accordance with 3.7 and 3.8 equations. From 10 to 20 measurements for each type of container and rope lengths were taken, cases presented in Table S3.1.

Table S3.1. Cargo oscillation damping ratio using control algorithm with different cargo conditions

Rope size Container type		The average of damping ratio ζ			
		0.9 m	1.9 m	2.3 m	Average:
Empty		0.157	0.066	0.035	0.086
Full		0.072	0.042	0.025	0.046
Unstable		0.121	0.065	0.046	0.077
Liquid		0.097	0.017	0.011	0.042
Average:		0.112	0.048	0.029	0.063

The experiments showed that the developed control algorithm without changing its parameters gives the best results using short cables (0.9 m), where the decay rate varies from an average of 0.072 when full container to 0.157 with an empty container. The control algorithm efficiency is at minimum at long rope (2.3 m), the decay rate averaged only 0.029 value. As in our experimental case, Ermidoro and others (Ermidoro, Cologne, Formentin, & Previdi 2016) compared two control techniques, within certain limits in order to suppress the load fluctuations. When the cable length is 3.0 m – damping coefficient is just 0.009, which is about 2 times worse than the worst of our measurement results obtained by experimental study. Assessing the system performance under K_{GS} controller case with a cable length of 3.0 m, an attenuation coefficient value is equal to 0.03, whereas for short rope case like in the dissertation, the decay rate on average is over 73% higher. In 4.5 m and 6.0 cable length cases, the damping coefficient value reaches 0.061 and 0.057, respectively. Which is less than 3% and 9% than the experimentally obtained damping coefficients. In order to identify where congestion cycle procedure ensures efficiency in time, (organoleptic) test was carried out with the container loading process, which the visually observed and registered (time of each procedure was recorded) for containers overload cycle “ship–shore–ship”. During the experiment, nine main overload cycle

“ship–shore–ship” procedures were distinguished, performed during transportation, which are provided in the conceptual field experiment model in figure S3.6.

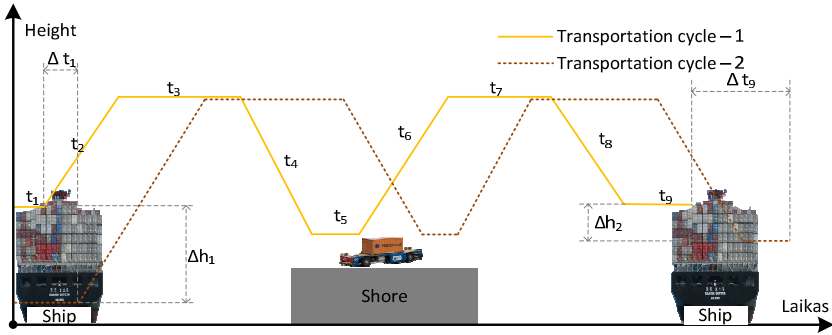


Fig. S3.6. The concept of field experiment and control algorithm efficiently

Container stack structure and size and the position of different containers affect the total minimum lifting height at which the crane can carry out other loading procedures. Also, the total duration of transportation depends container taking time Δt_1 and container stack position (height) Δh_1 . To transport the container presented below it will take more time – accordingly, it will take more time to lift it up (in is necessary to raise the difference Δh_1), which influences the overall transportation time, which varies in Δt_1 boundaries. Thus, the field experiment during the investigation results are presented in table S3.2.

Table S3.2. Results of field experiments during container transportation process

Cargo transportation stage	Minimal duration (s)	Maximal duration (s)	Average duration (s)
Handling – on the ship (t_1)	6	33	16
Liftering – from ship (t_2)	8	22	10
Transportation – to shore (t_3)	9	26	13
Lowering – to shore (t_4)	8	31	12
Handling – on shore (t_5)	5	28	18
“Ship–to–Shore” cargo cycle average duration	36	140	69

Assessment was made about the Klaipeda terminal mode and the available additional visual material collected during an internship in Netherlands, containers handling in the port of Rotterdam, it was decided to register only the duration of “ship–to–shore” transshipment procedures. Field experimental study showed that the minimal “ship–to–shore” cycle procedure duration – 39 seconds, maximum – 140 seconds, and the average was – 69 seconds. It can be concluded that the average per hour transshipment of containers is

40 units. In order to statistically assess one container overload cycle duration change by using the proposed control methodology, laboratory quay crane prototype was used that performed experimental studies in which the proposed control algorithm was used. The study was carried out with 40 cycles of overload “ship–to–shore” operations, under different conditions and different load types (described in Chapter 3). The results showed that the standard when the proposed methodology was used the overload “ship–to–shore” cycle time is reduced by 8% on average. The overload cycle “ship–to–shore” duration was shortened by 6 seconds. Thus, during the same period of time three more containers can be transported.

General Conclusions

1. Sources analysis show that the introduction of “Green Port”, “Autonomous Quay Crane” and “The Smart Container” concepts in the national port, as a single task in scientific research a single transport engineering task can be fragmented, to distinguish the object of the container “ship–shore–ship” node loading efficiency and importance. Sources indicate that the container overloading velocity increase created in autonomous ports is directly linked to the autonomous quay crane ability to create customized technological overload mode for particular container, by utilizing the RFID extracted information about the nature of the smart container and its cargo.

2. Designed second-order differential equations describing port container congestion quay crane mechanical processes, necessary for container handling dynamic simulation, the results of which are very important for programming: the crane trolley’s velocity profiles describing the actual load spatial movement velocity s , possible sway from instantaneous accelerations, vise stabilization and overall transport time.

3. Developed autonomous container quay crane laboratory prototype with a smart algorithm that allows safe and fast loading of containers cargo in cycle of “ship–shore–ship”:

3.1. Developed integrated autonomous quay crane control algorithm with proposed container fluctuations suppression subprogram, which allows the control system to use the PID controller (estimated parameters: $K_p = 0.6$, $K_i = 13$ and $K_d = 0.01$) with additional PI (estimated parameters: $K_p = 0.2$, $K_i = 2$) feedback and S-shaped engagement signal.

3.2. Designed laboratory quay crane experiment model allowed to verify the theoretical and simulation results, that when an S-shaped crane trolley dynamic mode is selected, it is possible to obtain an optimal solution for the specific loading mode on how to transport container, by reducing the cargo loading cycle.

4. Comparative and experimental results show that the proposed autonomous quay crane’s control algorithm with sway retardant subsystem enables fast container loading, as the resulting after about 400 cargo cycles using different cargos, container fluctuation average statistical coefficient is 0.068, which is 21% higher than in the known systems (0.056). Experimentally confirmed that when the proposed technology is used, one container loading cycle is shortened by 8% when transshipment of an average of 40 containers is performed.

Priedai³

A priedas. Pilnas krantinės kranio matematinis modelis

B priedas. Laboratorinis krantinės kranio prototipas

C priedas. Valdymo algoritmo programos pagrindinis kodas

D priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikti pridėtoje elektroninėje laikmenoje

Tomas EGLYNAS

JŪRINIAME INTERMODALINIAME TERMINALE NAUDOJAMŲ
IŠMANIŲJŲ KROVOS TECHNOLOGIJŲ KŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (03T)

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF SMART CARGO
TECHNOLOGIES FOR MARITIME INTERMODAL TERMINAL

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

2017 01 09. 14,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius