



KRANTINĖS KRANO VALDYMO SISTEMOS KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS OPTIMALIOMS PID VALDIKLIO VERTĖMS NUSTATYTI

Tomas EGLYNAS¹, Audrius SENULIS², Marijonas BOGDEVICĪUS³,
Arūnas ANDZIULIS⁴, Mindaugas JUSIS⁵

^{1, 2}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

^{1, 2, 3, 4, 5}Klaipėdos universitetas, JMTC, Klaipėda, Lietuva

El. paštas: ¹tmse@inbox.lt; ²audrius.senulis@ku.lt; ³marijonas.bogdevicius@vgtu.lt;

⁴arunas.iik.ku@gmail.com; ⁵tomas.lenkauskas@gmail.com

Santrauka. Jūriniame įvairiarūšiame terminale atliekant konteinerių krovos procesus, vienas iš krantinės kranų valdymo objektų yra vežimėlis. Viena iš problemų, su kuria susiduriama dažniausiai, yra konteinerio svyravimai, kuriuos, be išorinių veiksnių, taip pat sukelia ir vežimėlio judėjimas. Remdamiesi paskutinių kelerių metų tyrimais, mokslininkai sukūrė įvairių valdymo algoritmų, kurie laboratorinėmis sąlygomis sprendžia atskiras krantinės kranų valdymo problemas. Tačiau kompleksinių ir efektyvių valdymo algoritmų ir jų valdymo sistemos parametrų nustatymo metodai vis dar kuriami ir tobulinami. Šiame darbe sudarytas krantinės kranų vežimėlio su kabančiu kroviniu mechanizmo sistemos matematinis modelis. Šis modelis realizuotas *Matlab Simulink* aplinkoje ir sprendžiamas taikant *Dormand-Prince* metodą. Sukurtas laboratorinio krantinės kranų valdymo sistemos kompiuterinis modelis skirtas uždarosios valdymo sistemos PID valdiklio parametrams nustatyti, kai užduoties signalui taikomas S formos greičio kitimo profilis. Darbe pateiktas sistemos dinaminis modelis, aprašyta uždaroji valdymo sistema, pateikti kompiuterinio modeliavimo rezultatai, kuriuos planuojama panaudoti kaip pradinę informaciją realaus kranų PID valdiklio parametrams derinti. Atlikta simuliacija naudojant nustatytas vertes ir įvertinti krovinių svyravimai taikant S formos greičio kitimo profilį kartu su PID valdikliu vežimėlio greičiui valdyti.

Reikšminiai žodžiai: krantinės kranas, matematinis modelis, valdymo sistema, S profilis, PID valdiklis, *Matlab*.

Įvadas

Didėjant laivų talpai ir augant įvairiarūšių konteinerinių pervežimo tendencijoms, kyla poreikis kurti ir tobulinti įvairiarūšio transportavimo priemones uoste. Krantinės kranų poreikis labai padidėjo nuo tada, kai buvo sukurtas pirmasis krantinės kranas (Nenad *et al.* 2006; Georgijevič 2006; Crainic, Kim 2007). Šiems pokyčiams įtakos turėjo ne tik ekonominiai veiksniai ir besikeičiantys laivų dydžiai. Tobulėjant technologijoms, didėjant vartotojų poreikiams didėjo ir laivai, kartu didėjo ir krantinės kranai, kurie tapo masyvesni ir pajėgesni savo galimybėmis. Patobulėjo techninės jų charakteristikos ir valdymo sistemos, kurios papildytos sudėtingais krovos procesą reguliuojančiais algoritmais.

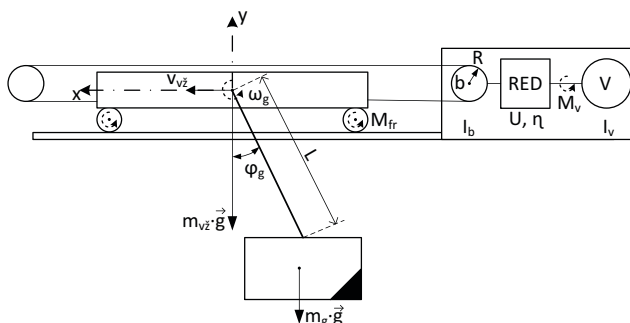
Pastaraisiais metais mokslininkai vis dažniau nagrinėja krantinės kranus. Viena iš problemų, su kuria susiduriama dažniausiai, – tai konteinerių kėlimo kranų ir jo valdymo algoritmų optimizavimas (Chao, Lin 2011; Schaub 2008; Chang *et al.* 2008; Li *et al.* 2012a; Tanaka *et al.* 2009). Iki šiol sukurta įvairių valdymo algoritmų, kurie laboratorinėmis sąlygomis sprendžia atskiras krantinės kranų

problemas. Tačiau vis dar išlieka kompleksinių algoritmų poreikis, kurie orientuoti ne tik į atskiras krovos procedūras, bet ir į visą „laivas – krantas – laivas“ krovos procesą. Dažniausiai naujų krantinės kranų valdymo algoritmų kūrimas (Chang *et al.* 2010) siejamas su uždaviniu, kuriame bandoma išspręsti konteinerio svyravimų problemą, o jos atsiradimo priežastys kiekvienu atveju gali būti skirtingos (Fang *et al.* 2012; Cao, Liu 2011; Yoshihara *et al.* 2003; Sano *et al.* 2010; Tanaka *et al.* 2008). Kartais svyravimus sukelia kranų mechanizmai, tokie kaip variklis ar nelygus bėgių paviršius, kuriais juda įrenginiai, tačiau pasitaiko ir atvejų, kai svyravimų priežastys yra kompleksinės. Jas gali sukelti sudėtinis poveikių rinkinys, veikiantis konteinerio plotą ar net pačiame konteineryje. Kaip vienas iš galimų sprendimų – modernioje intelektinėje kranų valdymo sistemoje įdiegtas valdymas derinant PID valdiklius su kitomis valdymo technikomis (Liu *et al.* 2011; Wang *et al.* 2015; Yang *et al.* 2008). Pastarųjų metų rezultatai rodo, kad užduoties valdymo signalo profiliavimas kartu su PID valdikliu duoda perspektyvius rezultatus (Majid *et al.* 2013;

Elbadawy, Shehata 2015). PID valdiklis pramonės perspektyvoje yra plačiausiai naudojamas dėl paprastos struktūros ir stabilus veikimo įvairiomis sąlygomis (Sun *et al.* 2015). Mokslininkas Liu (Liu *et al.* 2011) sukūrė valdymo sistemą, kurioje panaudojo neraiškiają logiką ir PID valdiklį, skirtą ožinio kranu krovinių transportavimo procesui valdyti. Mokslininkas pristatė visą sistemą ir atliko tyrimus, kurių rezultatai parodė, kad šių modernių valdymo technologijų derinimas duoda efektyvius rezultatus praktiškai realizuotinus krantinės kranų valdymo sistemose. Tačiau dauguma mokslininkų, valdant krantinės kranus, susiduria su PID valdiklio parametrų nustatymo problemomis. Tradiciniai parametrų derinimo metodai, tokie kaip bandymų ir klaidų metodas, yra vienas lengviausių būdų suderinti PID valdiklį, bet šiuo metodu gauti rezultatai neužtikrina, kad būsimoji bus reikšmingi ir efektyvūs (Jaafar *et al.* 2013a; Wong *et al.* 2012a). Plačiausiai taikomas valdiklio derinimo metodas (Zinglerio ir Nikolso), remiantis mokslininkų tyrimais (Jaafar *et al.* 2013a), neduoda norimų rezultatų taikant tokio pobūdžio valdymo sistemas. Atsižvelgiant į gaunamus rezultatus dėl agresyvumo ir didelių svyravimų perviršių mokslininkai PID valdiklio parametrus derinti taiko ir kitus metodus. Dažniausiai naudojamas PID valdiklis kartu su kintančiais parametrų parinkimo metodais, grindžiamais optimizacijos technikomis (Lv *et al.* 2012). Vieni tokių – tai genetiniai PID parametrų reguliavimo algoritmai, taikomi automatinėms kranų operacijoms vykdyti (Lv *et al.* 2012; Jaafar *et al.* 2013b), dirbtinės bičių kolonijos algoritmai, naudojami staigiams šuoliams ar laiko parametrus sumažinti (Li *et al.* 2012b), ir kiti.

Krantinės kranu valdymo sistemos matematinis modelis

Įvertinus mechaninės krantinės kranu kėlimo mechanizmo posistemio parametrus, sudarytas matematinis modelis, kuriuo remiantis *Matlab Simulink* aplinkoje sukurta kranu kėlimo mechanizmo ir griebtuvo valdymo sistema. Sukurtas



1 pav. Kranu vežimėlio su kroviniu dinaminis modelis
Fig. 1. Dynamics model of quay crane lifting mechanism with cargo

modelis atitinka laboratorinio prototipo fizinius parametrus, kurio dinaminis modelis pateikiamas 1 pav.

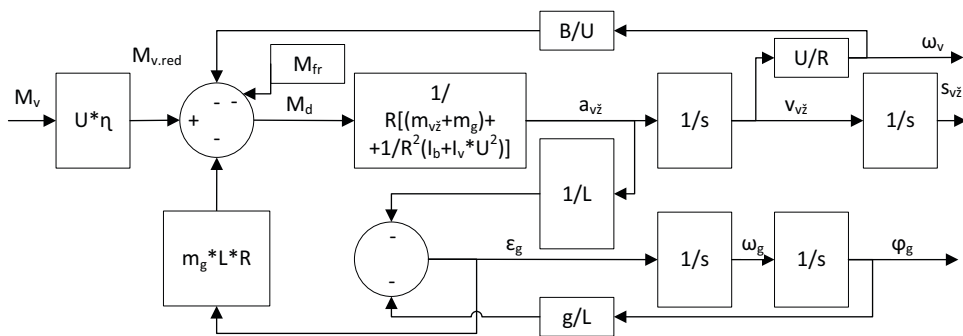
Kranu vežimėlio ir kroviniu sistemai sukurti *Matlab Simulink* programoje buvo sudaryta diferencialinių lygčių sistema, skirta blokinio modelio struktūrai:

$$\begin{cases} \frac{d\phi_g}{dt} = \omega_g, \frac{ds_{vz}}{dt} = v_{vz}, \\ \left[\begin{array}{l} (m_g + m_{vz}) \frac{dv_{vz}}{dt} + \\ + m_g L \frac{d\omega_g}{dt} + \\ + \frac{1}{R^2} (I_b + I_v U^2) \frac{dv_{vz}}{dt} \end{array} \right] \cdot R + M_{fr} = M_v U \eta, \\ m_g L \frac{dv_{vz}}{dt} + m_g L^2 \frac{d\omega_g}{dt} + m_g L g \phi_g = 0. \end{cases} \quad (1)$$

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

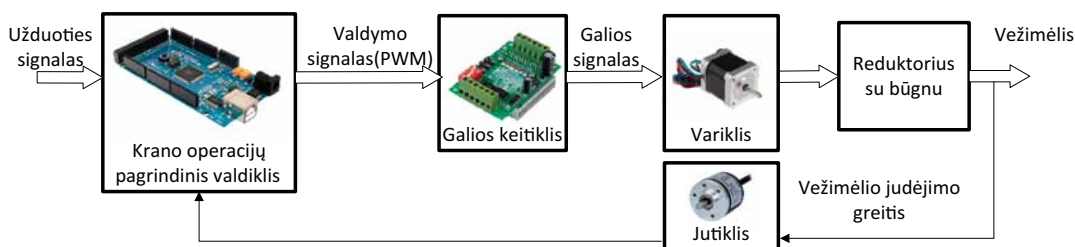
Pertvarkius diferencialinių lygčių sistemą (1), išreiškiant kintamųjų dv_{vz}/dt ir $d\omega_g/dt$ išvestines, sudaryta kranu vežimėlio su krovinių judėjimo mechanizmo pavaros mechaninio posistemio blokinė struktūrinė schema (2 pav.). Ja naudojantis galima nustatyti vežimėlio linijinį pagreitį, greitį, poslinkį ir kroviniu sukamojo judėjimo aplink tvirtinimo tašką svyravimų pagreitį, greitį ir svyravimų kampą. Taip pat blokinėje diagramoje įvertinta trinties apkrova bei variklio, būgno, kroviniu ir vežimėlio dinaminės charakteristikos – inercijos momentai, masės. Sudaryta blokinė schema struktūriškai gali būti tiesiogiai perkelta į *Simulink* aplinką, realizuojant sukurtos struktūros blokus, naudojantis programinio paketo funkcijų biblioteka.

Papildomai *Matlab Simulink* mechaninio posistemio modelyje panaudoti žemojo dažnio filtrai, siekiant išskirti kinematinių parametrų (tokių kaip vežimėlio greitis, pagreitis ir kiti) vertes, skirtas valdymo sistemai, nes realiose sistemose šią filtravimo funkciją atlieka mechaninių grandžių tarpusavio trintis (Popp *et al.* 2003). Pateiktame modelyje papildomai sudaryta skaičiavimo struktūra skirta skaičiuoti kroviniu linijiniams kinematinėms parametrus – kroviniu linijiniam svyravimo pagreičiui, greičiui ir poslinkiui (čia B variklio mechaninių dalių slopinimas). Kranu vežimėlio su kroviniu judėjimo mechanizmo mechaninio posistemio



2 pav. Krano vežimėlio su kroviniu judėjimo mechanizmo mechaninio posistemo blokinė schema

Fig. 2. Block diagram of lifting mechanism mechanical subsystem



3 pav. Valdymo sistemos blokinė diagrama

Fig. 3. Block diagram of control system

bloką sudaro du įėjimai ir dvylika išėjimų. Išėjimai apibūdina vežimėlio ir krovinio kinematinės savybes, o įėjimai skirti trinties jėgos apkrovos momento ir variklio momento įvesčiai. Valdymo sistemos parametrai: $L = 1,9 \text{ m}$; $m_g = 7,45 \text{ kg}$; $m_{vz} = 3 \text{ kg}$; $U = 3$; $B = 0,01 \text{ Ns/m}$; $R = 0,038 \text{ m}$; $I_b = 29 \cdot 10^{-5}$; $I_v = 44 \cdot 10^{-6}$. Aprašytos valdymo sistemos blokinė diagrama pateikiama 3 pav.

Laboratorinio krantinės kranų valdymo sistemą sudaro kranų operacijų valdiklis, kuris, gavęs užduoties komandą, generuoja valdymo signalą. Galios keitiklis atitinkamai generuoja galios signalą žingsniniam varikliui, kuris per reduktorių suka būgną. Vežimėlio judėjimo greitis per grįžtamojo ryšio jutiklį perduodamas valdikliui.

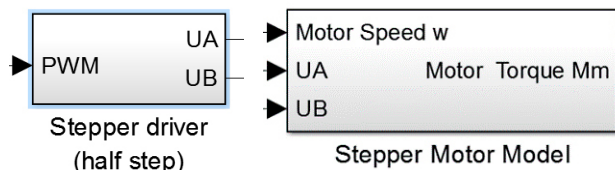
Sudarant matematinį modelį pagal laboratorinio fizinio modelio technines charakteristikas, buvo sukurtas *Matlab Simulink* žingsninio variklio blokas (modelis), kurio blokas pateiktas 4 pav. Šį modelį sudaro trys įėjimai ir vienas išėjimas, skirtas variklio momento skaičiavimo rezultatams pateikti tolimesniems skaičiavimams. Šio žingsninio variklio pagrindinė modelio matematinė išraiška pateikiama toliau (Hoang *et al.* 2008):

$$M_{motor} = -K_m \left(i_A - \frac{e_A}{R_m} \right) \sin(N_r \theta) + K_m \left(i_B - \frac{e_B}{R_m} \right) \cos(N_r \theta) - M_d \sin(4N_r \theta), \quad (2)$$

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 posistemo bloko vidinėje struktūroje skaičiuojamos žingsninio variklio srovės. Taip pat įvertinta variklio sukuriamų vidinių įtampų įtaka ir variklio vidinis pasipriešinimo momentas. Žingsninio variklio blokinio modelio įėjimo parametrai perduodami iš valdomo galios keitiklio išėjimų (4 pav.).

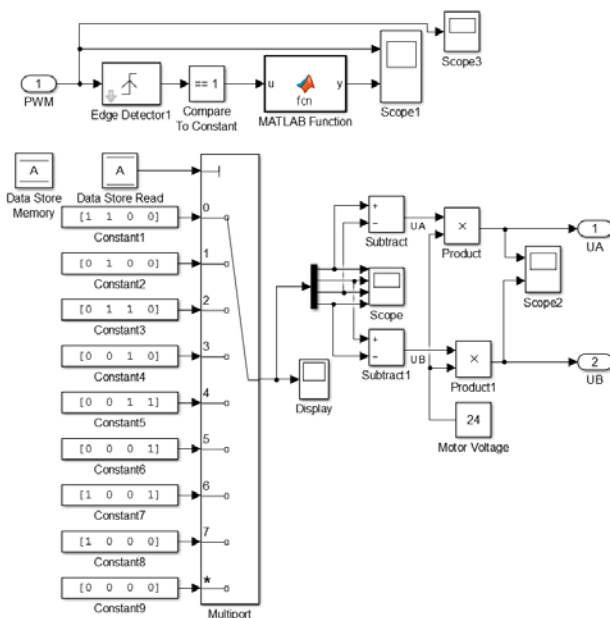


4 pav. Valdomo galios keitiklio ir žingsninio variklio mechaninio posistemo blokas

Fig. 4. Controllable power inverter subsystem block

Šio keitiklio modelio išėjimo signalai yra variklio apvijų maitinimo įtampos UA ir UB. Jo posistemo bloko vidinė struktūra pateikiama 5 pav.

Valdomo galios keitiklio posistemo bloko įėjime siunčiamas PWM signalas iš PWM generatoriaus bloko, o pats blokas generuoja signalą, skirtą žingsniniam varikliui, kad jis dirbtų pusinio žingsnio režimu, taip didindamas

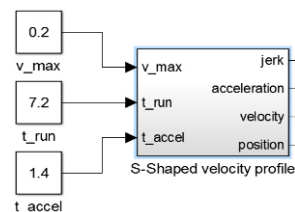


5 pav. Valdomo galios keitiklio posistemio bloko vidinė struktūra
Fig. 5. Controllable power inverter subsystem internal block structure

momentą. Šio *Simulink* bloko paskirtis – realizuoti matematinių modelių *Arduino* vidinę funkciją, kuri iš dažnio, proporcingo kranų vežimėlio su krovinio judėjimo linijiniam greičiui Y ašimi, keičia į PWM valdymo signalą, skirtą galios keitiklio bloko (pateikto 5 pav.) įėjimui. Šis dažnio keitimas realizuotas struktūriškai.

Simulink matematiniam modelyje taip pat yra dar du papildomi blokai – vienas skirtas greičio signalui pakeisti į nustatytą dažnį, kuris siunčiamas į PWM generatoriaus įėjimą, o kitas blokas skirtas S greičio kitimo profilio nustatančio greičio signalui formuoti (6 pav.).

Pateiktas matematinis modelis buvo derinamas su laboratoriniu kraninės kranų prototipu, lyginant modelio ir prototipo vežimėlio bei griebtuvo su krovinio reakcijas į

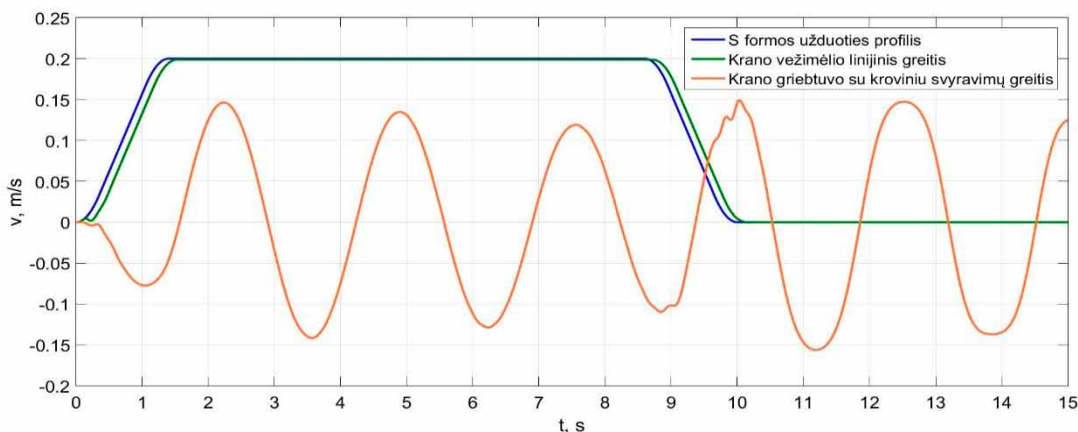


6 pav. S formos greičio kitimo profilio formavimo blokas
Fig. 6. S-shape velocity profiling block

S formos greičio užduoties profilį. Suderintas matematinis modelis panaudotas PID valdiklio pirminiams (K_p , T_i , T_d) parametrų nustatymui.

PID valdiklio parametrų nustatymas matematinio modeliavimo metodu *Simulink* aplinkoje

Atliktas kompiuterinis modeliavimas ir simuliacija *Simulink* aplinkoje, kurios metu panaudotas S formos įėjimo greičio kitimo profilis, kai kranų vežimėlio valdymo sistema yra atvirojo tipo (be grįžtamojo ryšio). Simuliacijos metu imituojamas kraninės kranų vežimėlio judėjimas su krovinio, kai linų ilgis 1,9 metro, o judėjimo greitis – 0,2 m/s. Gauti rezultatai pateikti 7 pav. Čia S formos profilio signalas vaizduojamas žalia spalva, kranų vežimėlio greitis – mėlyna linija, o krovinio svyravimų linijinis greitis krovinio pakabinimo taško atžvilgiu – raudona spalva. Gauti rezultatai rodo, kad, taikant atvirojo tipo valdymo sistemą, vežimėlis vėluoja reaguoti į užduoties signalą dinaminio režimu ir turi dinaminę paklaidą, o dėl grįžtamojo ryšio nebuvimo atsiranda statinė paklaida, kuri šiuo atveju yra lygi 1,3 %. Krovinio svyravimų greitis siekia 0,15 m/s ir slopsta – svyravimų amplitudės procentinis sumažėjimas per periodą 7,7 %, o dažnis – 0,374 Hz. Šio eksperimento rezultatai bus laikomi atskaitos tašku nustatant ir vertinant



7 pav. S formos greičio kitimo profilio (žalias), vežimėlio greičio (mėlyna) ir krovinio greičio svyravimų (raudona) grafikai
Fig. 7. S-shape velocity profile (green), trolley speed (blue) and spreader oscillation speed (red) graphs

1 lentelė. PID valdiklio parametrų verčių parinkimo lentelė

Table 1. The table of PID values calculations

Nr	Kp	Ti	Td	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_{vz}^2 dt,$ rad^2s	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_g^2 dt,$ rad^2s	Nr	Kp	Ti	Td	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_{vz}^2 dt,$ rad^2s	$\frac{1}{2} \int \varepsilon_g^2 dt,$ rad^2s
S formos greičio kitimo profilis be grįžtamojo ryšio						14	0,25	13	0	0,0002453	0,06383
1	–	–	–	0,0005104	0,06045	15	0,3	13	0	0,0002384	0,06375
S formos greičio kitimo profilis su PID valdikliu ir greičio grįžtamoju ryšiu						16	0,4	13	0	0,000229	0,06341
						17	0,5	13	0	0,0002234	0,06308
2	0,25	0	0	0,1057	0,003571	18	0,6	13	0	0,0002219	0,06282
3	0,5	0	0	0,07355	0,009511	19	0,7	13	0	0,0002478	0,0629
4	0,75	0	0	0,05411	0,0168	20	0,6	13	0,001	0,0002198	0,06285
5	1	0	0	0,04149	0,0229	21	0,6	13	0,002	0,0002185	0,06284
6	1,25	0	0	NESTABILI		22	0,6	13	0,004	0,000217	0,06278
8	0,25	1	0	0,01304	0,01188	23	0,6	13	0,006	0,0002163	0,06275
9	0,25	2	0	0,005395	0,03046	24	0,6	13	0,008	0,0002158	0,06271
10	0,25	3	0	0,002996	0,04363	25	0,6	13	0,01	0,0002155	0,06237
11	0,25	5	0	0,001304	0,0568	26	0,6	13	0,012	0,0002154	0,06265
12	0,25	10	0	0,0003723	0,06336	27	0,6	13	0,015	0,0002154	0,06265
13	0,25	15	0	0,005045	0,08118	28	0,6	13	0,016	0,0002154	0,06265

PID valdiklio parametrų efektyvumą.

Laboratorijoje eksperimentiškai nustačius S formos greičio kitimo profilio įtaką vežimėliui ir kroviniui, modelis papildytas PID valdiklio grandimi, kur S formos greičio kitimo profilis bus naudojamas kaip užduoties signalas.

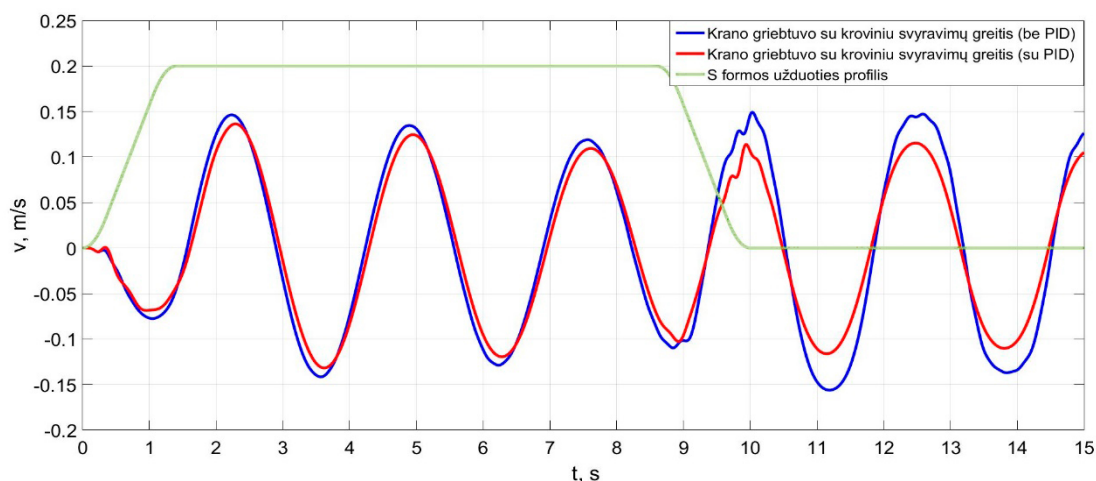
Šio valdiklio parametrus derinimas fiziniame laboratoriniame prototipe sudėtinga dėl techninių apribojimų ir galimų gedimų, parinkus netinkamus parametrus. Todėl nuspręsta PID valdiklio parametrus nustatyti taikant *Matlab Simulink* matematinį modelį. Daugelyje mokslinių darbų (Jaafar *et al.* 2013b; Wong *et al.* 2012a, 2012b) ir juose taikomų PID valdiklio parametrų derinimo metodų, siekiant minimizuoti svyravimus, atsižvelgiant į sistemos sudėtingumą ir laisvai pakabintą krovinį, sukurtos metodikos neduoda norimo rezultato, todėl nuspręsta valdiklį derinti empiriniu būdu – eksperimentiškai nustatant valdiklio koeficientus, su kuriais griebtuvo ir juo transportuojamo krovinio išliekamieji svyravimai yra minimalūs. Nagrinėjamoje sistemoje taip pat yra aktualus ir papildomas valdymo kontūras, kuris reaguotų ne į vežimėlio greitį, bet į griebtuvo su kroviniu svyravimus, tačiau šią papildomą sistemą planuojama nagrinėti ateityje.

Eksperimentiniu empiriniu metodu nustatytos PID valdiklio koeficientų vertės pateiktos 1 lentelėje. Minimizavimas atliekamas taikant kvadratinį paklaidos integralinį kriterijų. Pirmas modeliavimo eksperimentas buvo atliekamas be grįžtamųjų ryšių (kranų vežimėlio greičio ir krovinio svyravimų linijinio greičio). Pradiniu priartėjimu buvo nustatomi PID valdiklio parametrai, kai sistemoje

yra tik kranų vežimėlio linijinio greičio grįžtamasis ryšys.

1 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). Didinant Kp koeficientą, šis nuokrypis mažėja. Todėl tolimesnei paieškai pasirinkta Kp = 0,25 vertė ir bus nustatoma PID valdiklio integruojanti koeficiento dedamoji. Šiuo nustatymu siekiama kuo mažesnės vežimėlio judėjimo paklaidos. Didinant integruojančios dedamosios koeficientą, didėja sistemos reakcijos greitis.

Pagal modeliavimo rezultatus, esant tik vienam grįžtamajam ryšiui, kaip minėta, pagal 1 lentelės 25 bandymą gauti tokie PID valdiklio parametrai: Kp = 0,6, Ki = 13 ir Kd = 0,01. Pritaikius šiuos parametrus krantinės kranų valdymo sistemai su grįžtamoju ryšiu, kur valdymas atliekamas PID valdikliu, ir panaudojant S formos greičio kitimo užduoties profilį, sumodeliuotasis pereinamasis procesas kranų vežimėlio judėjimo greičiui ir krovinio svyravimų greičiams palyginti pavaizduotas 8 pav. Iš gautų rezultatų galima padaryti tokias išvadas: nusistovėjusiu režimu kranų vežimėlio statinė paklaida yra lygi nuliui dėl integruojančios PID valdiklio dedamosios; dinaminės kranų vežimėlio paklaidos yra perpus mažesnės nei atviros sistemos, tai parodo integralinis vežimėlio greičio paklaidos kriterijus (1 lentelė). Dinaminės paklaidos kompensuojamos PID valdiklio proporcinga ir diferencialine dedamąja. Krovinio švytavimams kompensuoti būtinas papildomas grįžtamasis ryšys, kuris šiame modelyje nevertinamas.



8 pav. S formos greičio kitimo profilio (žalias), vežimėlio greičio (mėlyna) ir krovinio greičio svyravimų (raudona) grafikai, naudojant PID valdiklį ir vieną grįžtamąjį ryšį

Fig. 8. S-shape velocity profile (green), trolley speed (blue) and spreader oscillation speed (red) graphs with PID controller and one feedback

Pagal 1 lentelės duomenis ir modeliavimo rezultatus buvo pasirinkti tokie PID valdiklio koeficientai: $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$. Pasirinktas 25 bandymas, nes tuo momentu vežimėlio integralinis kvadratinis nuokrypis yra mažiausias valdymo sistemoje, o krovinio svyravimų kvadratinis integralinis nuokrypis nuo šios vertės kinta kas 3 procentus. Šie gauti valdiklių parametrai yra pradiniai PID valdiklio duomenys, nustatyti eksperimentiniu empiriniu metodu, taikant matematinį modelį, suprojektuotą *Simulink* aplinkoje. Šis matematinis krantinės kėlimo mechanizmo modelis leidžia efektyviai nustatyti PID valdiklio vertes, atsižvelgiant į sistemos sudėtingumą, kai krovins pakabintas ant lynų.

Išvados

Šiame darbe sudarytas krantinės kranų vežimėlio ir kėlimo mechanizmo sistemos matematinis modelis *Matlab Simulink* aplinkoje, įvertinant vežimėlio su kroviniu ir variklio apkrovas. Sukurti S formos greičio kitimo profilio formavimo ir PID valdiklio posistemių matematiniai struktūriniai modeliai. Taip pat aprašyta uždaroji valdymo sistema, skirta PID valdiklio pirminėms vertėms nustatyti, kurios gali būti panaudotos kaip pradinė informacija realaus kranų PID valdiklio parametrų derinti. Atlikta kompiuterinė simuliacija taikant tik S formos greičio kitimo profilį ir kartu su PID valdikliu, naudojant nustatytas optimalias vertes, vežimėlio greičiui valdyti. Gauti rezultatai rodo, kad, taikant atvirojo tipo valdymo sistemą, vežimėlis vėluoja reaguoti į užduoties signalą, o dėl grįžtamojo ryšio nebuvimo (taikant tik S formos greičio kitimo profilį) atsiranda statinė paklaida, kuri yra lygi 1,3 %. Krovinio svyravimų pradinis greitis siekia 0,15 m/s ir slopsta – svyravimų

amplitudės procentinis sumažėjimas per periodą sudaro 7,7 %, o dažnis 0,374 Hz. Papildžius kranų valdymo sistemą ne tik užduoties S profiliu, bet ir PID valdikliu su vežimėlio greičio grįžtamoju ryšiu, statinė paklaida tampa lygi nuliui, krovinio svyravimų pradinis greitis yra lygus 0,15, svyravimų dažnis 0,377 Hz, o svyravimų amplitudės procentinis sumažėjimas per periodą slopimas 8,5 %. Taip pat sumažėja dinaminė paklaida – pagal integralinį vežimėlio greičio kriterijų ji sumažėja du kartus. Kranų krovinio svyravimų greičio sumažėjimas nėra didelis, todėl šiai sistemai būtinas papildomas grįžtamasis ryšys nuo krovinio svyravimų. Šis tyrimas numatomas kituose sistemos tyrimo etapuose. Matematinio modeliavimo būdu nustatytos PID valdiklio vertės: PID: $K_p = 0,6$, $K_i = 13$ ir $K_d = 0,01$.

Literatūra

- Cao, L.; Liu, L. 2011. Adaptive fuzzy sliding mode method-based position and anti-swing control for overhead cranes, iš *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 6–7 January 2011, IEEE, 2: 335–338 [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5720788>
- Chang, C.; Chiang, K.; Description, A. S. 2008. The nonlinear 3-D crane control with an intelligent operating method, iš *SICE Annual Conference*, 20–22 August 2008, 2917–2921.
- Chang, D., et al. 2010. Integrating berth allocation and quay crane assignments, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46(6): 975–990 [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554510000608>. <https://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 [interaktyvus],

- [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554510001225>. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.002>
- Crainic, T.G.; Kim, K. H. 2007. Intermodal Transportation, *Transportation* 14(6): 467–537.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2165-3>
- 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. 2006. Container terminals in river ports, *FME Transactions* 34: 199–204.
- Hoang L.-H.; Brunelle, P.; Sybille, G. 2008. Design and implementation of a versatile stepper motor model for simulink's SimPowerSystems, iš *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 30 June – 2 July 2008, IEEE, 437–442 [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. spalio 31 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4677271/>
- Yang, C.; Zhang, Z.; Zhao, Q. 2008. Study on intelligent control of two-dimensional precision positioning system, iš *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 12–14 December 2008, IEEE, 835–838 [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. spalio 31 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4722748>
- Yoshihara, H.; Fujioka, N.; Kasahara, H. 2003. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes, iš *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, 12–16 October 2003, IEEE, 1: 262–269 [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. spalio 31 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1257512>
- Jaafar, H. I.; Sulaima, M. F., et al. 2013a. Optimal PID controller parameters for nonlinear gantry crane system via MOPSO technique, iš *Proceedings – 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology, IEEE CSUDET 2013*, 30 May – 01 June 2013, IEEE, 86–91.
- Jaafar, H. I.; Mohamed, Z., et al. 2013b. PSO-tuned PID controller for a nonlinear gantry crane system, iš *Proceedings – 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2012*, 23–25 November 2012, IEEE, 515–519.
- Li, Z.-j., et al. 2012a. Research of coordinated control method of hybrid power crane system, iš *2012 Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC)*, 24–26 June 2012, IEEE, 1093–1097.
- Li, P.; Li, Z.; Yang, Y. 2012b. The application research of ant colony optimization algorithm for intelligent control on special crane, iš *2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, 8–10 December 2012, IEEE, 999–1004 [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. rugpjūčio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6429073>
- Liu, C.; Zhao, H.; Cui, Y. 2011. Research on application of fuzzy PID in collective pitch control system, iš *2011 International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)*, 30–31 July 2011, IEEE, 1–4 [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. rugpjūčio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5997553>
- Lv, N., et al. 2012. Based on PID control optimization of synchronous motor control, iš *Conference on Measurement, Information and Control (MIC)*, 18–20 May 2012, IEEE, 2111–2114.
- Majid, M. A., et al. 2013. A comparison of PID and PD controller with input shaping technique for 3D gantry crane, iš *Proceedings – 2013 IEEE Conference on Systems, Process and Control, ICSPC 2013*, 13–15 December 2013, IEEE, 144–148.
- Nenad, Z.; Oguamanam, D.; Bošnjak, S. 2006. Dynamics and modelling of mega quayside container cranes, *FME Transactions* 34: 193–198.
- Popp, K.; Panning, L.; Sextro, W. 2003. Vibration damping by friction forces: theory and applications, *Journal of Vibration and Control* 9(3–4): 419–448. <https://doi.org/10.1177/107754603030780>
- Sano, H., et al. 2010. Anti-sway crane control based on dual state observer with sensor-delay correction, iš *2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 21–24 March 2010, IEEE, 679–684 [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. rugpjūčio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5464050>
- Schaub, H. 2008. Rate-based ship-mounted crane payload pendulation control system, *Control Engineering Practice* 16(1): 132–145 [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066107000913>. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.04.011>
- Sun, Z., et al. 2015. A DE based PID controller for two dimensional overhead crane, *Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese*, 28–30 July 2015, IEEE, 1: 2546–2550.
- Tanaka, Y., et al. 2008. Control of container crane by binary input using Mixed Logical Dynamical system, iš *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, 14–17 October 2008, IEEE, 2: 13–17 [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4694521>.
- Tanaka, Y., et al., 2009. Development of high speed controller of container crane by binary input using mixed logical dynamical system, iš *2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, 7–9 December 2009, IEEE, 181–184 [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5412636>
- Wang, L.; Zhang, H.; Kong, Z. 2015. Anti-swing Control of Overhead Crane Based on Double Fuzzy Controllers, iš *Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese*, 23–25 May 2015, IEEE, 981–986.
- 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, iš *ICIAS 2012–2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems: A Conference of World Engineering, Science and Technology Congress (ESTCON) – Conference Proceedings*, 12–14 June 2012, IEEE, 1: 111–116.
- 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*, 12–14 June 2012, IEEE, 1: 34–39.

MODELING AND SIMULATION OF QUAY CRANE CONTROL SYSTEM FOR PID CONTROLLER OPTIMAL PARAMETERS DETERMINATION

**T. Eglynas, A. Senulis, M. Bogdevičius, A. Andziulis,
M. Jusis**

Abstract

The main control object of Quay crane, which is operating in seaport intermodal terminal cargo loading and unloading process, is the crane trolley. One of the main frequent problem, which occurs, is the swinging of the container. This swinging is caused not only by external forces but also by the movement of the trolley. The research results of recent years produced various types of control algorithms by the other researchers. The control algorithms are solving separate control problems of Quay crane in laboratory environment. However, there is still complex control algorithm design and the controller's parameter estimation problems to be solved. This paper presents mathematical model of the Quay crane trolley mechanism with the suspended cargo. The mathematical model is implemented in Matlab Simulink environment and using Dormand-Prince solving method. The presented model of laboratory quay crane mathematical model is dedicated to parameter estimation of PID controller of closed loop system with the usage of S-form speed input profile. The article includes the dynamic model of the presented system, the description of closed loop system and modeling results. These results will be used as an initial information for the PID parameters estimation in real quay crane control system. The simulation of the model was performed using estimated values of controller. The sway influence of the cargo, the usage of the trolley speed input S-shaper and the PID controller was used to control the trolley speed.

Keywords: quay crane, mathematical model, control system, S-profile, PID controller, Matlab.