



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Aivija Podeckytė**

**LANGŲ PAKETŲ MONTAVIMO ROBOTO KINEMATIKOS**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Valdas Eidukynas

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**LANGŲ PAKETŲ MONTAVIMO ROBOTO KINEMATIKOS**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)**

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Valdas Eidukynas  
(data)

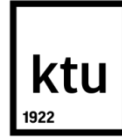
**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Kazimieras Juzėnas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Aivija Podeckytė  
(data)

**KAUNAS, 2017**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Aivija Podeckytė

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Langų paketų montavimo roboto kinematikos tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės \_\_\_\_\_ 19 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Aivijos Podeckytės**, baigiamasis projektas tema „Langų paketų montavimo roboto kinematikos tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## TURINYS

SANTRAUKA .....	5
SUMMARY .....	6
ĮVADAS.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	9
1.1. Stiklo paketų montavimo įrenginių patentų apžvalga .....	9
1.2. Langų paketų montavimo įrenginių rinkos apžvalga .....	11
2 STIKLO PAKETŲ MONTAVIMO BŪDAI .....	19
2.1. Viengubo stiklo paketo stiklinimo metodai .....	19
2.2. Langų paketų montavimo robotu metodai.....	21
2.2.1. HRC stiklinimo metodas .....	21
2.2.2. Stiklinimo metodas robotui judant sąnarų erdvėje .....	22
2.2.3. Montavimo metodas naudojant robotą judantį Dekarto plokštumoje .....	23
3. Modernizuojamas Robotas <i>XX 100</i> .....	25
3.1. Prototipo konstrukcija ir jo charakteristikos .....	25
3.2. Prototipo kinematika ir modernizavimo gairės .....	26
4. ROBOTO <i>XX 100</i> REVERSINIS DARBINIŲ JUDESIŲ KINEMATIKOS TYRIMAS... 28	
4.1. Tyrimo metodika .....	28
4.2. Tiriamojo modelio sudarymas.....	28
4.3. Stiklo paketo charakteringų taškų judėjimo trajektorijų nustatymas jį montuojant.....	29
4.4. Roboto judėjimo verifikavimas .....	30
4.5. Roboto <i>XX 100</i> darbinių judesių tyrimas .....	34
5. ROBOTO <i>XX 100</i> TIESIOGINIS DARBINIŲ JUDESIŲ KINEMATIKOS TYRIMAS... 42	
5.1. Roboto variklių parametrai .....	42
5.2. Tiesioginio judesių tyrimo rezultatai .....	45
IŠVADOS .....	47
LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	48
PRIEDAI	
1 Priedas. Rezultatai lokioje koordinacių sistemoje	

Podeckytė, Aivija. Langų paketų montavimo roboto kinematikos tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Valdas Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis ir kryptis: Technologijų mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: robotas, kinematinė analizė, *SolidWorks* pramos priedas *Motion*, judėjimo trajektorija, reversinė analizė.

Kaunas, 2017. 50 p.

## SANTRAUKA

Rinkoje vis daugėja robotų, padedančių atlikti langų paketų montavimo darbus. Tokie robotai labai palengvina darbą darbuotojams, jiems sumažindami fizinį krūvį, taip pat pagreitina montavimo procesą. Darbuotojai dauguma tokių robotų valdo rankiniu būdu, todėl lango montavimo darbai užtrunka ilgiau ir dėl žmogiškojo faktoriaus yra didesnė tikimybė pažeisti lango paketą. Siekiant išspręsti šias problemas, atliktas tiriamasis darbas, kurio tikslas – automatizuoti stiklų paketų montavimo roboto darbo judesius.

Šiame magistro baigiamajame darbe apžvelgti rinkoje esantys langų paketų montavimo darbus palengvinantys įrenginiai. Detaliau aptarti stiklo paketų montavimo būdai naudojant montavimo robotus. Pateiktas montavimo roboto prototipo aprašymas. Sudarytas roboto prototipo tiriamasis modelis. Nustatytos stiklo paketo viršutinės ir apatinės dalių judėjimo trajektorijos iki lango rėmo. Ištirti roboto prototipo grandžių judėjimo dėsniai, kuriais remiantis buvo parinkti roboto variklių parametrai. Tyrimai atlikti naudojantis programos *SolidWorks* priedu *Motion Analysis*.

Podeckytė, Aivija. *Kinematics Analysis of Glass Panels Mounting Robot*. Master's degree thesis in Mechanical Engineering / supervisor assoc. doc. dr. Valdas Eidukymas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area and field: Technological Sciences, Mechanical Engineering.

Keywords: robot, kinematic analysis, *SolidWorks Motion*, motion trajectory, reverse analysis.

Kaunas, 2017. 50 p.

## SUMMARY

In today's market amount of robots that helps workers in window installation is increasing. The result of help of these robots are reduced physical labor of workers and increased speed of glass package installation process. Most of these robots are controlled manually, therefore window installation process lasts longer and because of human resources there is possibility of damaging packet of the window that is being installed. As a solution for this problem this research was made and the purpose of it is to automate and modernize the movements of glass package installing robots.

In this final project of magister studies review of tools and devices that are used to help during installation process were made. The ways of glass panel installation using robots are discussed in detail. Prototype of installation robot is introduced. Trajectories of glass panel top and bottom parts movement along the rim of the window were calculated. The laws of movement of this experimental robot were researched which helped to configure engines that these robots use. Researches were made using *Motion Analysis* plugin of *SolidWorks* software.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas  
Vytautas Grigas

\_\_\_\_\_  
(Parašas, data)

Mechanikos inžinerijos krypties studijų  
programų vadovas Kęstutis Pilkauskas

\_\_\_\_\_  
(Parašas, data)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS**  
**Studijų programa: MECHANIKOS INŽINERIJA - 621H30001**

Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V 25-11-8

Išduota MD M – 5/5 gr. studentei Aivijai Podeckytei

1. Darbo tema: *Langų paketų montavimo roboto kinematikos tyrimas (angl. Kinematics Analysis of Glass Panels Mounting Robot)*

2. Darbo tikslas: *Automatizuoti stiklų paketų montavimo roboto darbo judesius.*

3. Darbo uždaviniai

1. *Atlikti stiklo montavimą palengvinančių įrenginių apžvalgą ir išanalizuoti modernizuojamo prototipo konstrukciją.*
2. *Nustatyti robotą valdančių variklių judėjimo dėsnius.*
3. *Nustatyti reikiamą skirtingų roboto valdymo algoritmų kieki montuojant nurodytą stiklo paketų gamą.*
4. *Ištirti reikiamą roboto judesiu tikslumą.*
- 5.

4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos:

- *montuojamų stiklo paketų masė – 90 kg;*
- *montuojamų stiklo paketų aukštis 2000 – 3000 mm;*
- *pradinis stiklo paketo kampas 13°;*
- *stiklo paketo montavimo laikas 60 s.*

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas

*iki 2017 05 19*

\_\_\_\_\_  
( data)

Užduotį gavau: *Aivija Podeckytė*

\_\_\_\_\_  
(studento vardas, pavardė, parašas)

\_\_\_\_\_  
( data)

Vadovas:

*doc. dr. Valdas Eidukynas*

\_\_\_\_\_  
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

\_\_\_\_\_  
( data)

## IVADAS

Iki šiol stiklo paketai pastatuose dažniausiai montuojami rankiniu būdu. Tai labai sunkus ir reikalaujantis didelės fizinės jėgos darbas, kurio metu yra nemaža tikimybė susižeisti, pavyzdžiui, keliant daug sveriančius stiklo lakštus, galima patirti įvairias nugaros traumas. Montuojant stiklą aukštuose biurų pastatuose dėl ribotų fizinių galimybių, darbuotojų darbo našumas nėra didelis, todėl ilgėja darbo trukmė. Siekiant padidinti darbo našumą įmonėje, pasitelkiama technikos pažanga, kuri „didina gamybos organizavimo ir jos kultūros, specialiojo bei bendrojo visų darbuotojų išsilavinimo reikalavimus. Kartu naujos technikos diegimas įmonėse sudaro galimybes iš pagrindų pagerinti ir palengvinti darbo sąlygas, sutrumpinti darbo trukmę, likviduoti sunkų fizinį ir nekvalifikuotą darbą, didinti produkcijos gamybą, gerinti jos kokybę“ (Jakutis, Kazlovas ir Kvantūnas, 2007, p.78) [1].

Statybų pramonėje vis labiau populiarėja robotai, palengvinantys darbuotojams langų montavimo darbus. Robotai ne tik sumažina darbuotojui fizinį krūvį, bet ir pagerina darbo sąlygas bei pakeičia darbo pobūdį. Darbuotojo pagrindiniu darbu tampa roboto valdymas ir technologijos proceso kontroliavimas, todėl darbuotojui išauga kvalifikaciniai reikalavimai. Robotai ar kiti pažangios technikos įrenginiai nepakeičia žmogų, bet jam padeda. Danijos robotikos kompanijos užsakymu Lietuvoje sukurtas roboto *XX 100* prototipas, kurio tikslas yra perimti žmogaus fizinį darbą montuojant langus biurų pastatuose.

Robotas *XX 100* skirtas tik vitrininių langų montavimui, jis gali įstatyti stiklą į reikiamą vietą tik valdomas žmogaus, todėl montavimo darbai atliekami ilgiau ir ne taip tiksliai ir sklandžiai, kaip automatizuotais robotais.

**Šio tiriamojo darbo tikslas** – automatizuoti stiklų paketų montavimo roboto darbo judesius.

**Šiam tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:**

1. Atlikti stiklo montavimą palengvinančių įrenginių apžvalgą ir išanalizuoti modernizuojamo prototipo konstrukciją.
2. Nustatyti robotą valdančių variklių judėjimo dėsnius.
3. Nustatyti reikiamą skirtingų roboto valdymo algoritmų kiekį montuojant nurodytą stiklo paketų gamą.
4. Iširti reikiamą roboto judesių tikslumą.
5. Nustatyti robotą valdančių variklių greičius.

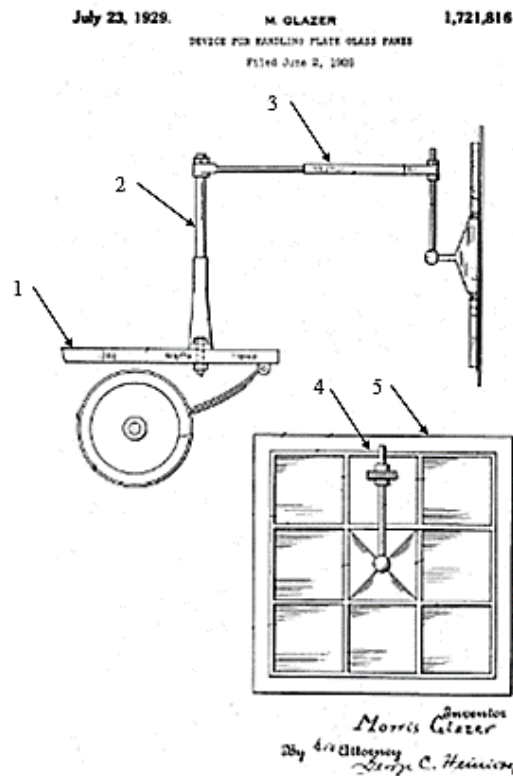


# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

Langų paketų montavimo įrenginiai yra skirti perkelti lango paketą iki reikiamos vietos, palengvinti montavimo darbus, juos atliekant kuo tiksliau ir mažiau naudojant žmogaus fizinę jėgą. Vis labiau populiarėja robotai, manipulatoriai, keltuvai ir kitokie įrenginiai, kurie langų montavimui naudoja vakuumo technologiją. Langų paketų montavimo įrenginiai naudojami langus montuojant lauko sąlygomis, taip pat ir darbus atliekant pastato viduje. Šios paskirties įrenginiai yra įvairios konstrukcijos, galintys kelti nuo keliasdešimties iki kelių šimtų kilogramų, ar net iki 1000 kg ir didesnės masės krovinius. Šių įrenginių didelis privalumas yra tai, kad transportuojant, keliant ar montuojant bet kokios masės stiklo paketą, jo paviršius nepažeidžiamas.

## 1.1. Stiklo paketų montavimo įrenginių patentų apžvalga

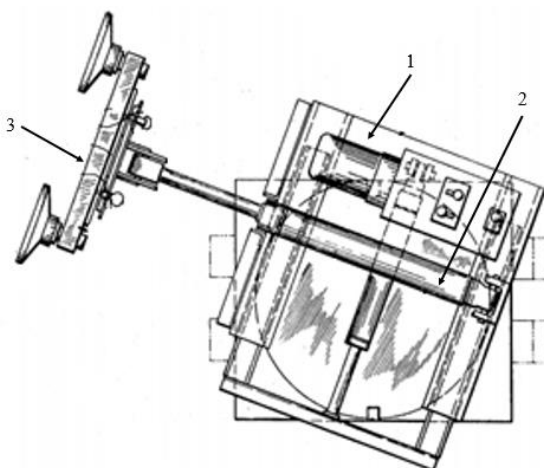
Žmogaus sveikata ir darbo našumu susirūpinta gan seniai. Dvidešimtojo amžiaus pradžioje amerikietis Morisas Gleizeris pasiūlė stiklo plokščių montavimo darbus palengvinsiančio įrenginio idėją, kurią užpatentavo 1929-aisiais metais [2]. Patente įvardinti šio įrenginio tikslai – palengvinti stiklo lakštų pakėlimą, transportavimą iki lango stiklinimo vietos, taip pat palengvinti langų stiklinimo proceso darbus bei apsaugoti stiklo lakštą nuo paviršiaus pažeidimų ir sudužimo. Įrenginio griebtuvas, prie kurio tvirtinamas stiklo lakštas, turėtų būti gaminamas ir atskirų detalių, kurios būtų lengvai surenkamos. Morisas Gleizeris siūlo, kad įrenginio konstrukcija būtų kuo paprastesnė, patvari ir nebrangiai pagaminama. Šio įrenginio konstrukciją sudaro (1.1 pav.): pagrindas su ratais 1, dvi teleskopinės kolonos – vertikali 2 ir horizontali 3 ir pritraukiančio griebtuvo rėmas. Šio įrenginio idėja išsiskiria tuo, kad dėl įrenginio tvirtinimo ant pagrindo su ratais, stiklo lakštą galima nesunkiai transportuoti iš vienos vietos į kitą. Patento aprašyme nurodoma vertikali stiklo laikymo padėtis transportavimo metu. Vertikalia teleskopine kolona reguliuojamas įrenginio aukštis, todėl langą galima lengviau įstiklinti skirtinguose aukščiuose. Horizontalia teleskopine kolona reguliuojamas įrenginio ilgis horizontalia kryptimi. Taip pat įrenginys turėtų funkciją pasukti stiklo lakštą, kuris griebtuvu būtų pasukamas horizontaliai ir vertikalčiai. Amerikiečio užpatentuota įrenginio idėja dabartinėje rinkoje pritaikyta automobiliniuose vakuuminiuose keltuvuose.



**1.1 pav.** Moriso Gleizerio įrenginio eskizinis brėžinys [2]:

- 1 – pagrindas su ratais; 2 – vertikali teleskopinė kolona; 3 – horizontali teleskopinė kolona; 4 – pritraukiantis griebtuvas; 5 – stiklo paketas

Statant naujus šiuolaikinius, ypač komercinės paskirties pastatus, architektai vis dažniau ryžtasi savo projektuose naudoti didelius langus, kurie yra ne tik estetiškai patrauklūs, bet ir į pastato vidų praleidžia daugiau saulės spindulių, todėl žiemą patalpose būna šilčiau. Dėl didelių stiklo paketų matmenų ir didelės masės langus įstiklinti yra sudėtinga, todėl šiai problemai išspręsti 1971-aisiais metais Robertas J. Emke užpatentavo mobilų stiklo paketų montavimo įrenginį išradimą [3]. Šis išradimas ne tik supaprastina stiklo instaliavimo procesą, bet ir sumažina lango montavimo išlaidas. Įrenginys skirtas kelti, transportuoti ir manipuluoti ne tik stiklo lakštus, bet ir kitus sunkius plokščius krovinis, kuriuos reikia tiksliai padėti į vietą. Šiuo įrenginiu nustatyti krovinio padėti, jį transportuoti ir valdyti įrenginį gali vienas žmogus. Šio stiklo lakštų montavimo įrenginio konstrukcijos pagrindinės dalys yra: judama platforma 1, du hidrauliniai cilindrai 2 ir vakuuminis griebtuvas 3 (1.2 pav.). Stiklo lakštai prie griebtuvo prisiurbiami sudarant vakuumą, horizontalia kryptimi pasukami judama platforma, o montavimo aukštis reguliuojamas hidrauliniais cilindrais. Vakuuminis griebtuvas su įrenginiu sujungtas lankstu, todėl krovinį galima pasukti vertikalia kryptimi.



**1.2 pav.** Roberto J. Emke įrenginys [3]:

1 – judama platforma; 2 – hidraulinis cilindras; 3 – vakuuminis griebtuvas

## **1.2. Langų paketų montavimo įrenginių rinkos apžvalga**

Montavimo įrenginiai, ypač montavimo robotai, vis labiau populiarėja, todėl rinkoje yra daugybė įmonių, siūlančių įvairiausių tipų robotus, keltuvus, kranus ir kitus įrenginius, palengvinančius langų montavimą. Norint išsirinkti tinkamiausią įrenginį, reikia žinoti, kokios didžiausios masės ir matmenų bus kroviny, koku atstumu jis bus transportuojamas ir kokiomis aplinkos sąlygomis bus naudojamas. Langų paketų montavimo įrenginių pasirinkimas yra didelis, bet jų klasifikacija nėra aiškiai apibrėžta, todėl šiame poskyryje pateikti keli iš labiausiai rinkoje paplitusių įrenginių.

**Vakuuminis keltuvas *SL400 Sky Lifter*** (1.3 pav.) – tai Danijos įmonės *Smart lift* įrenginys, skirtas palengvinti montavimo darbus, galintis pakelti įvairias orui nelaidžias, lygaus paviršiaus plokštes, fasadų elementus, taip pat gali kelti duris ir langus. Įrenginio keliamoji galia siekia iki 400 kg [4]. Ši keltuva galima priskirti automobilinių keltuvų kategorijai. Šio įrenginio konstrukciją sudaro automobilis su teleskopine kolona, prie kurios tvirtinamas vakuuminis griebtuvas (1.4 pav.). Šio vakuuminio keltuvo vakuuminis griebtuvas lengvai nuimamas ir esant poreikiui pakeičiamas į kitą. Tai elektrinis keltuvas, kurio elektriniais valdymo įtaisais galima tiksliai manevruoti vakuuminį griebtuvą nuotoliniu būdu, taip darbuotojui išvengiant sunkių krovinių kėlimo ir didelio fizinio krūvio ypač atliekant langų montavimo darbus [5]. Šio keltuvo nuotolinis valdymo diapazonas yra 100 metrų. Vakuuminio keltuvo *SL400 Sky Lifter* trūkumai: tinkamas tik darbui lauke, sudėtinga ir brangi keltuvo eksploatacija dideliu atstumu.

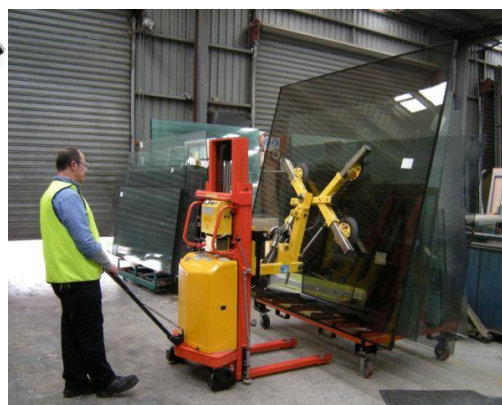


**1.3 pav.** *Sky Lifter SL400* vakuuminis keltuvas [4]



**1.4 pav.** Vakuuminis griebtuvas [4]

**Stiklo keltuvas *Horizon*** (1.5 pav.) – tai Australijos įmonės *Quattrolifts* įrenginys, kuris skirtas darbuotojui padėti transportuoti stiklo lakštus ir juos padėti ant pjovimo staklių ar kito, stiklo apdirbimui skirto, įrenginio. Tai hidraulinis keltuvas su vakuuminio griebtuvu, kurio keliamoji galia yra 300 kg [6]. Keltuvas *Horizon* dažniausiai naudojamas gamybos cechuose, kuriuose reikia kelti sunkius stiklo lakštus, taip sumažinant fizinio darbo krūvį. Šis įrenginys nėra pritaikytas darbui statybos pramonėje, dėl jo konstrukcijos, įrenginys nėra daugiavandenis ir nėra pritaikomas langų montavimo darbams.



**1.5 pav.** Keltuvas *Horizon* [6]

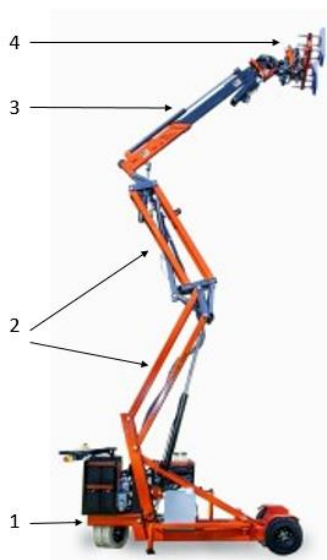
**Fork Lift *Verti-Clad*** (1.6 pav.) – tai Jungtinės Karalystės įmonės *GGR Group* vakuuminis griebtuvas, kuris skirtas tvirtinti prie elektrinio automobilinio krautuvo arba prie teleskopinio kranų, kaip anksčiau aprašytame *SL400 Sky Lifter* įrenginyje. *GGR Group* įmonės vakuuminis griebtuvas nuo

anksčiau aprašyto skiriasi tuo, kad jis turi garsinio ir vaizdinio įspėjimo, susidarius žemam slėgiui, funkciją, bei turi nuotolinio valdymo funkciją. Su *Fork Lift Verti-Clad* įrengimu montuojami ne tik plokšti stiklo lakštai, bet ir vertikalios pastatų sienų plokštės, kurių ilgis gali būti iki 14 metrų, o keliamoji galia yra iki 400 kg [7]. Šio įrengimo didžiausias privalumas, kad galima naudoti įvairioje aplinkoje tiek lauke, tiek ir viduje, o pagrindiniai trūkumai yra: netinkamas naudoti lyjant ir reikalingas papildomas įrenginys, prie kurio būtų galimybė pritvirtinti šį griebtuvą.



**1.6 pav.** *Forklift Verti-Clad* vakuuminis griebtuvas pritvirtintas prie elektrinio šakinio automobilinio krautuvo [7]: 1 – automobilinis krautuvas; 2 – vakuuminis griebtuvas

Visiškai kitokios konstrukcijos nuo prieš tai aprašytų įrenginių yra amerikiečių įmonės *Ergo Robotic Solutions* keltuvas **GM 2000-26** (1.7 pav.). Šis keltuvas susideda iš važiavimo mechanizmo 1, dviejų strėlių 2 ir vienos teleskopinės strėlės 3 ir vakuuminio griebtuvo 4. Keltuvas kėlimo aukštis reguliuojamas hidrauliniiais cilindrais. Keltuvas *GM 2000-26* iš kitų išsiskiria ne tik kompaktiška sulankstoma konstrukcija (1.8 pav. a), dėl kurios keltuvas paprasčiau transportuojamas, bet ir įdomiu sprendimu įrenginio stabilumui padidinti – prailginama važiavimo mechanizmo dalimi (1.8 pav. b). Keltuvas keliamoji galia yra 900 kg.



**1.7 pav.** Keltuvas *GM 2000-26* [8]: 1 – važiavimo mechanizmas; 2 – strėlės; 3 – teleskopinė strėlė; 4 – vakuuminis griebtuvas



a)

b)

**1.8 pav.** Keltuvo *GM 2000-26* konfigūracijos [8]: a) prailgintas važiavimo mechanizmas; b) kompaktiškiausia forma

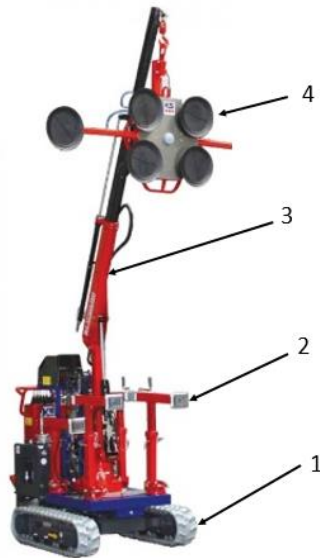
Manipuliacinis *Ergonomic manipulating unit (EMU)* (1.9 pav.) – tai dar vienas Jungtinės Karalystės įmonės *GGR Group* kuriamų produktų pavyzdys. Šis manipuliatorius specialiai sukurtas darbui pastato viduje. Įrenginiu galima kelti stiklo, plastiko, keramikos plokštes ir metalo lakštus. Keliamoji galia gali būti iki 300 kg arba iki 500 kg, priklausomai nuo pasirinktos įrenginio konfigūracijos. Manipuliacinį *EMU* sudaro pagrindas su ratukais, ant kurio yra sukama kolona, ja manipuliatorių galima pasukti 90 laipsnių į kairę ir į dešinę puses. Prie sukamos kolonos pritvirtinta teleskopinė kolona su vakuuminiu griebtuvu. Manipuliacinio stabilumas užtikrinamas prie pagrindo pritvirtintomis kojėlėmis. Šio įrenginio darbinės zonos spindulys yra 4,4 m. Šio įrenginio trūkumas –

norint užtikrinti jo stabilumą, reikia nemažai vietos, nes nuo pagrindo atlenktos kojelės užima nemažai papildomos vietos.



**1.9 pav.** Manipulatorius *EMU* [9]

Vokietijos įmonės *KS Schulten* siūloma kėlimo įranga *KS Multi Crawler* (1.10 pav.) yra panaši į manipulatorių *EMU*, nes taip pat turi prie pagrindo pritvirtintą teleskopinę koloną, prie kurios prijungtas vakuuminis griebtuvas, dar kitas panašumas yra, kad abu įrenginiai turi atlenkiamas stabilumo kojeles. Vienas iš didžiausių skirtumų tarp šių įrenginių – įrenginio *KS Multi Crawler* pagrindas yra vikšrinė važiuoklė. Dėl vikšrų šis įrenginys gali judėti sudėtingomis aplinkos sąlygomis, pavyzdžiui, smėliu, žvyru, žole ar net drėgnoje dirvoje. Įrenginys yra su hidrauline pavara, kontroliuojamas valdymo pultu, aukštis reguliuojamas teleskopine kolona, kuri dar gali būti pasukama 180 laipsnių kampu. Keliamoji galia yra iki 500 kg. Šis keltuvas gali būti naudojamas ne tik lauke, bet ir pastato viduje. Dėl nedidelio pločio įrenginys nesudėtingai transportuojamas siaurais koridoriais ir pasižymi mažu apsisukimo spinduliu, todėl nereikalinga didelė darbinė zona. Keltuvas *KS Multi Crawler* pranašesnis už manipulatorių *EMU*, nes atlenktos stabilumo kojelės yra prie pat vikšrinio pagrindo, todėl neužima papildomai vietos. Kitas privalumas – reikalui esant, šis keltuvas gali būti visiškai nuimamas nuo vikšrinės važiuoklės ir naudojamas kaip atskiras ir stacionarus įrenginys (1.11 pav.).



**1.10 pav.** *KS Multi Crawler* keltuvas [10]: 1 – vikšrinė važiuoklė; 2 – kojelės; 3 – teleskopinė kolona; 4 – vakuuminis griebtuvus



a)



b)

**1.11 pav.** *KS Multi Crawler* keltuvas [10]: a) su atlenktomis kojelėmis; b) atskirtas nuo vikšrinės važiuoklės

Stiklo paketams montuoti naudojami ne tik įvairios konstrukcijos keltuvai, kranai ir manipulatoriai, bet ir robotai. Pavyzdžiui, Danijos įmonė *GMV A/S* yra sukūrusi langų stiklinimo robotų seriją *Winlet*. Robotai *Winlet* tarpusavyje beveik nesiskiria nei dizainu, nei konstrukcija, tačiau jų keliamoji galia ir maksimalus kėlimo aukštis yra skirtingi ir vienas iš robotų (*Winlet 350 TH*) yra



naudojamas kaip galinis vykdymo įtaisas, tvirtinamas prie automobilinio kranų ar rankinio keltuvo (1.12 pav.).



**1.12 pav.** *Winlet 350 TH* galinis vykdymo įtaisas [11]

Kiti robotai *Winlet* yra pritaikyti montavimo darbų atlikimui pastato viduje. Dėl nedidelių matmenų ir kompaktiškos konstrukcijos lengvai transportuojami liftu ar siaurais koridoriais. Robotai *Winlet* tarpusavyje skiriasi pagrindiniais matmenimis (ilgiu ir pločiu), maksimaliu krovinio kėlimo aukščiu (nuo 2,8 m iki 4,1 m) ir skirtinga keliamąją galia (nuo 350 kg iki 1000 kg). Šiais robotais galima kelti: granito ar betono plokštes, plastiko lakštus, plienines ar medines plokštes, stiklo paketus.



**1.13 pav.** Robotų *Winlet* konfigūracijos [12]

Montavimo robotai skirti pakelti, pasukti, gabenti ir montuoti, naudojami, kai su įprasta technika sudėtinga arba neįmanoma patekti į pastato vidų ir ten, kur sunki statybų įranga negali būti naudojama [13]. Robotų *Winlet* konstrukciją sudaro važiavimo mechanizmas su įkraunama baterija, hidraulinis cilindras, teleskopinė kolona, galinis vykdymo įtaisas – vakuuminis griebtuvas, stabilumo

kojelės. Šių robotų judėjimas ir atliekami darbiniai judesiai yra automatizuoti. Įrenginiai valdomi daugiafunkciniu valdymo pultu su integruotais mygtukais ir signalinėmis lemputėmis (1.14 pav.).

Montavimo robotai *Winlet* pranašesni už kitus dėl automatizuoto valdymo, dėl kurio stiklo paketai yra greičiau ir labai tiksliai įstatomi į lango rėmą ir dėl kompaktiškos konstrukcijos. Tokie robotai, esantys darbo režime neskleidžia didelio triukšmo, todėl juos naudojant, jų triukšmo lygis yra žemas.



**1.14pav.** Roboto *Winlet* valdymo pultas[13]

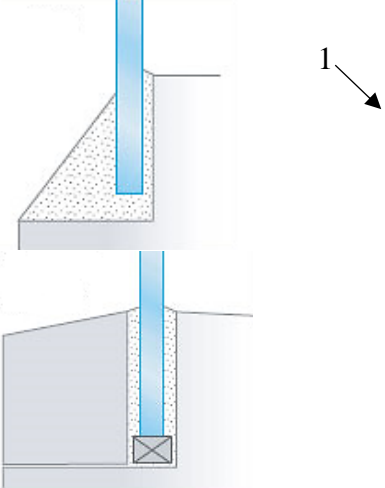
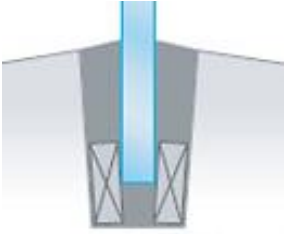
Siekiant padidinti montavimo darbų našumą ir darbuotojams sumažinti fizinį krūvį, vis labiau populiarėja robotai, palengvinantys darbą, todėl jų pasirinkimas rinkoje vis didėja. Stiklo paketų montavimo darbus palengvinantys robotai turi ne tik privalumų, bet ir trūkumų. Pagrindiniai trūkumai yra susiję su montavimo robotų valdymu ir stiklo instaliavimo metodais. Darbuotojai dauguma tokių robotų valdo rankiniu būdu, todėl lango montavimo darbai užtrunka ilgiau ir dėl žmogiškojo faktoriaus yra didesnė tikimybė pažeisti stiklo paketą. Siekiant išspręsti šias problemas, reikia automatizuoti robotų langų paketų montavimo procesą.

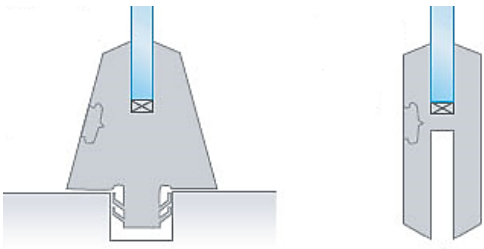
## 2 STIKLO PAKETŲ MONTAVIMO BŪDAI

### 2.1. Viengubo stiklo paketo stiklinimo metodai

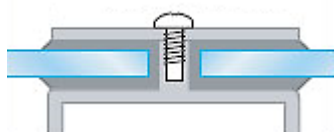

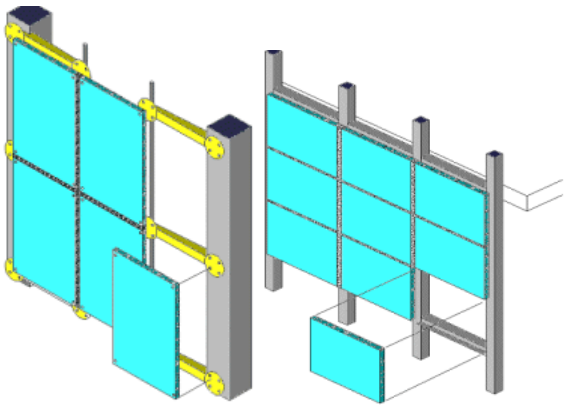
Stiklo paketai būna skirtingo stiklo lakštų skaičiaus: vieno, dviejų ir daugiau lakštų. Skirtingų stiklo paketų stiklinimo būdai skiriasi, atsižvelgiant į stiklo lakštų skaičių. Šiame skyriuje apžvelgiami tik vieną stiklo lakštą turinčių stiklo paketų montavimo būdai, kurie pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Viengubo stiklo stiklinimo būdai

Eil. Nr.	Stiklinimo būdas	Aprašymas
1.	Stiklo įstatymas be profilio (kairėje) ir su profiliu (dešinėje) 	Stiklas įstatomas į rėmą be profilio, stiklo lakštą pritvirtinant glaistu, nepraleidžiančiu orą.  Stiklas įstatomas į rėmą ir prilaikomas profiliu (1). Montuojant stiklą, naudojamas sandariklis (glaistas, guminės juostelės) [14].
2.	Stiklo įstatymas į rėmo griovelį tarp dviejų komponentų 	Šis metodas naudojamas, stiklo paketą montuojant į betono, akmenis ar medinio rėmo griovelį, įterpiant tarpines ar sandariklius [14].

3.	<p>Naudojant struktūrinį tarpiklį Y (kairėje) arba H (dešinėje) formos</p> 	<p>Stiklo paketas įstatomas į struktūrinę Y arba H formos tarpinę. Tarpinė laiko stiklą rėmo griovelyje ir atlieka sandarinimo funkciją – nepraleidžia oro [14].</p>
----	--	--

2.1 lentelės tęsinys

4.	<p>Naudojant ne struktūrinį tarpiklį</p> 	<p>Stiklo paketo įstatymas į kanalo tipo (paveikslėlyje pavaizduotas U tipas) tarpiklį, prispaudžiant varžtu. Stiklą laiko tarpiklis ir prispaudžiantis elementas [14].</p>
5.	<p>Įklijuojamo stiklo paketo technologija (angl. <i>bonding inside</i>)</p> 	<p>Stiklo paketas įklijuojamas į lango rėmę esančią stiklui skirtą griovelį, nenaudojant plieninių sutvirtinimų [15].</p>
6.	<p>Struktūrinis stiklo stiklinimas (angl. <i>structural glazing</i>) naudojant tvirtinimo elementus (kairėje) arba kljus (dešinėje)</p> 	<p>Stiklo paketas prie rėmo tvirtinamas tvirtinimo elementais taip, kad langas atrodytų berėmis.</p> <p>Stiklo paketas prie rėmo priklijuojamas silikoniniais kljais arba tvirtinamas sandarikliais, taip pat, kad langas iš lauko pusės atrodytų berėmis [16].</p>

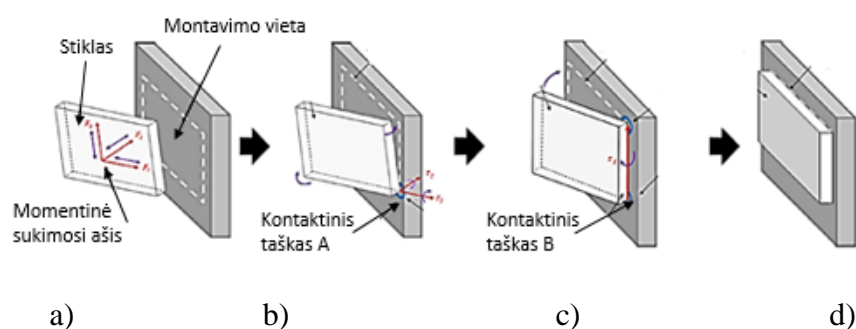
## 2.2. Langų paketų montavimo robotu metodai

Langų paketai robotu gali būti montuojami dviem metodais: 1) naudojant pusiau automatizuotą sistemą arba 2) naudojant visiškai automatizuotą sistemą. Pirmoji sistema yra, kai roboto grandžių judesius valdo žmogus, o antroji – kai robotas darbinus judesius atlieka pats.

### 2.2.1. HRC stiklinimo metodas

Myeong-Su Gil ir kt. aprašė pusiau automatizuotą sistemą HRC (angl. *human robot cooperation*), valdomą žmogaus [17]. Montuojant lango paketą HRC metodu atliekamas toks veiksmų algoritmas (2.1 pav.):

- lango paketo vienas iš apatinių taškų yra transportuojamas iki rėmo kontaktinio taško A, tuo metu  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  yra generuojamos ant momentinio sukimosi ašies;
- kitas apatinis lango paketo taškas yra pasukamas taip, kad vienas iš viršutinių lango paketo taškų būtų prie rėmo kontaktinio taško B;
- lango paketas pasukamas apie vertikalią sukimosi ašį (vektorių nuo kontaktinio taško A iki kontaktinio taško B);
- kai lango paketas yra lygiagretus rėmui, montavimo procesas yra užbaigtas.



**2.1 pav.** Stiklo paketo montavimo metodas HRC [17]: a) linijinis judesys; b) sukamasis judesys  $T_z$  ir  $T_y$ ; c) sukamasis judesys  $T_x$ ; d) montavimas atliktas

Iš 2.1 paveikslo matyti, kad lango paketą montuojant HRC metodu, momentinė sukimosi ašis keičiasi tris kartus, kol stiklas yra įstatomas į rėmą. Montavimui atlikti reikalingi roboto grandžių darbiniai judesiai yra linijinis ir sukamasis, kuriuos žmogus valdo rankiniu būdu. Naudojant šį metodą, žmogus nemažai turi atlikti įvairių judesių, pagelbėdamas robotui įstatyti lango paketą į vietą.

2008-aisiais metais Vilniaus Gedimino technikos universiteto organizuotame simpoziume „Automatika ir robotika statyboje“ [18] buvo pristatyti tyrimai, atlikti su HRC sistema. Simpoziumo metu pristatytas pramoninis robotas, naudojamas statyboje, bet naudojamas tik lauko sąlygomis. Tokie pramoniniai robotai naudojami dinamiškoje aplinkoje, kurioje statiniai, operatoriai, įranga nuolat keičiasi, todėl nustatyta, kad robotai vis tiek turi būti valdomi darbuotojo. Tyrimų metu buvo tirti du langų paketų montavimo metodai: lango paketo montavimas su žmogaus valdomu robotu ir palygintas su žmogaus darbo našumu, kai lango paketą mechaniškai montuoja tik žmogus. Šių metodų palyginimas pateiktas 2.2 lentelėje. Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad langų paketų montavimas su robotu HRC metodu yra pranašesnis už mechanišką žmogaus darbą. Naudojant robotus sumažinama stuburo, raumenų patempimų ir kitokių traumų rizika, o svarbiausiai padidinamas darbo našumas.

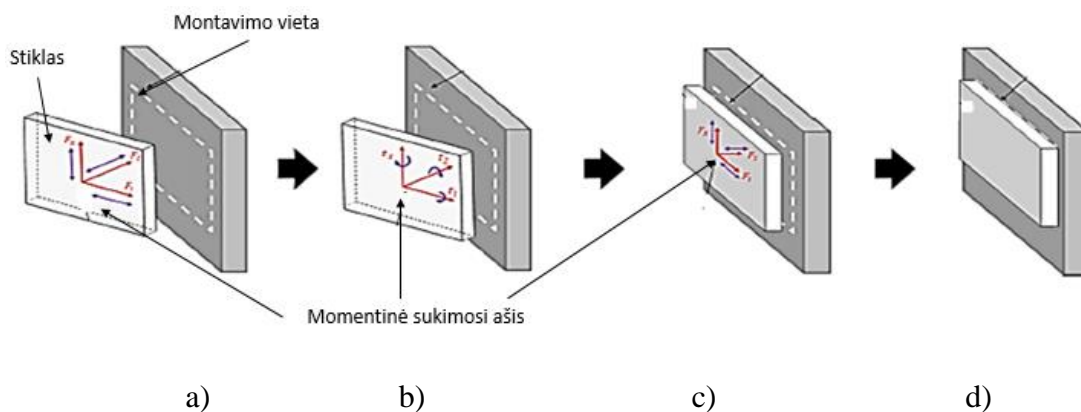
**2.2 lentelė.** Žmogaus darbo našumo palyginimas su roboto darbo produktyvumu [18]

	Žmogus	Robotas (HRC sistema)
Montavimo laikas	18 min	15 min
Darbo intensyvumas	Aukštas momentinis darbo intensyvumas	Žemas darbo intensyvumas
Saugumas	Pavojingas darbas, didelė sužalojimų rizika	Sumažintas pavojus darbuotojo sveikatai
Darbuotojų skaičius	3	2

### 2.2.2. *Stiklinimo metodas robotui judant sąnarų erdvėje*

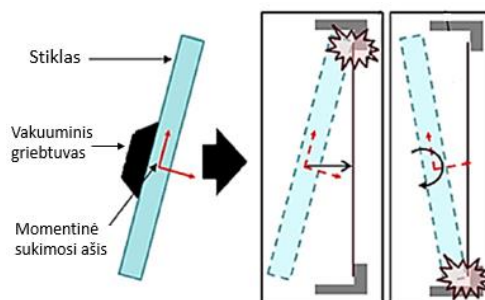
Kitas stiklinimo metodas aprašytas Myeong-Su Gil ir kt. [17] yra stiklo paketo montavimas robotu, kurio judesiai aprašomi pagal jo sąnarų konstrukcines galimybes. Lango paketą montuojant šiuo metodu atliekamas toks veiksmų algoritmas (2.2 pav.):

- a) lango paketas dideliu greičiu transportuojamas į stiklinimo vietą (dominuoja apkrovos  $F_x$ ,  $F_y$  ir  $F_z$ ;
- b) lango paketas pasukamas iki numatytos montavimo vietos, (dominuoja sukimo momentai  $T_x$ ,  $T_y$  ir  $T_z$ ), stiklo paketas sulygiuojamas lygiagrečiai su lango rėmu;
- c) lango paketas nedideliu linijiniu judesiu priartinamas prie lango rėmo;
- d) b ir c judesiai kartojami tol, kol lango paketo montavimas yra baigiamas.



**2.2 pav.** Stiklo paketo montavimo metodas sąnarų erdvėje[17]: a) linijinis judesys-didelis judesys; b) sukamasis judesys; c) linijinis judesys-mažas judesys; d) montavimas atliktas

Pastovi momentinė sukimosi ašis, kaip parodyta 2.3 paveiksle, yra priežastis didinti roboto galinio vykdymo įtaiso sukamojo ir slenkamojo judėjimų pakartotinių skaičių, kol stiklo paketas įstatomas į lango rėmą. Montavimo darbas iš roboto reikalauja daug daugiau judesių nei iš statybos darbuotojo, todėl šio metodo efektyvumas yra mažesnis už darbuotojo. Montuojant stiklo paketą šiuo metodu, darbuotojas privalo būti labai atidus, kad nesudaužytų stiklo.

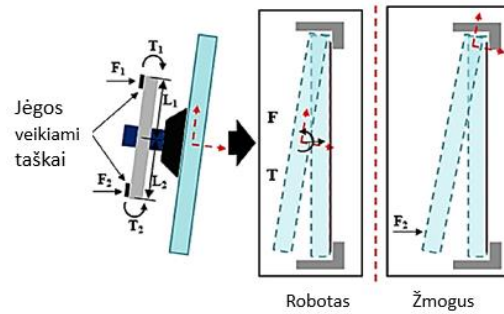


**2.3 pav.** Montavimo metodo problemos montuojant robotu, judančiu sąnarų erdvėje

### 2.2.3. Montavimo metodas naudojant robotą judantį Dekarto plokštumoje

Siekiant išspręsti prieš tai aprašyto metodo problemą, Myeong-Su Gil ir kt. simpoziumo metu pristatė lango paketo montavimo robotą, kuris valdomas Dekarto koordinatių sistemoje [17]. Teoriškai, montavimo metodas naudojant robotą, judantį Dekarto plokštumoje yra efektyvesnis nei metodas naudojant robotą, judantį sąnarų erdvėje. Roboto, judančio Dekarto plokštumoje, galinis vykdymo įtaisas turi 6 laisvės laipsnius, todėl reikia daugiau kaip dviejų veikiamų taškų. Šiais taškais roboto manipulatoriui perduodamas sukimo momentas, susidaręs tarp darbuotojo ir manipulatoriaus, todėl

atsiranda nenumatyti judesiai, kuriais valdomas robotas. Žmogaus montuojamas stiklo paketas veikiamas tik linijine jėga  $F_2$ , kaip parodyta 2.4 paveiksle. Tokie nenumatyti judesiai montuojant šiuo metodu yra pakartotiniai ir neefektyvūs.



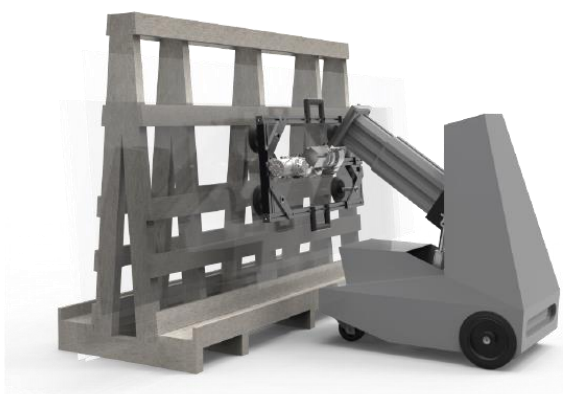
**2.4 pav.** Montavimo metodo problemos montuojant robotu, judančiu Dekarto plokštumoje



### 3. Modernizuojamas Robotas *XX 100*

#### 3.1. Prototipo konstrukcija ir jo charakteristikos

Roboto *XX 100* prototipo (3.1 pav.) tikslas – padėti montuoti vitrininių langų stiklo paketus. Šis prototipas sukurtas stiklo paketų montavimui dirbant pastato viduje, todėl robotui buvo apibrėžti tam tikri matmenų reikalavimai. Nurodyta, kad robotas turi būti kuo mažesnis, kad būtų nesudėtingai transportuojamas ne tik iki pastato, bet ir jame, kad galėtų važiuoti siaurais pastato koridoriais ir tilptų lifte.



**3.1 pav.** Roboto prototipas *XX 100* [12]

Roboto *XX 100* charakteristikos:

- Roboto matmenys transportuojant – 600 x 1200 x 900 mm (plotis x aukštis x ilgis).
- Roboto matmenys darbo metu (be stiklo paketo) – 600 x 1800 x 1500 mm.
- Roboto masė – apie 180 kg.
- Keliamoji galia – iki 90 kg.
- Roboto galinis vykdymo įtaisas – vakuuminis griebtuvas.
- Hidraulinių cilindrų maksimali eiga – 200 mm.
- Teleskopinės kolonos maksimali eiga – 650 mm
- Prototipo judėjimo greitis – 0-1,5 m/s.

Stiklo paketo charakteristikos:

- Stiklo paketo matmenys – 900 x 2700 mm (plotis x aukštis).
- Maksimali masė yra 90 kg.
- Stiklo paketo instaliavimo laikas mažesnis nei 90 s.
- Stiklo paketas transportuojamas horizontalioje padėtyje.
- Stiklo paketas prieš montavimą pasukamas vertikaliai.

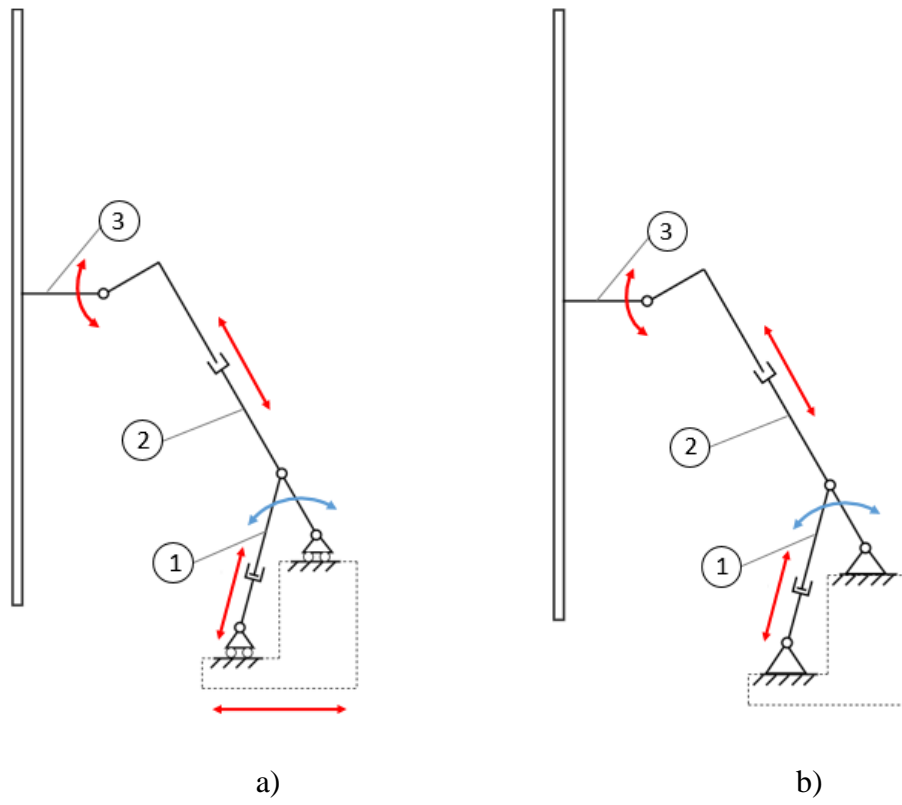
Roboto *XX 100* pagrindinės konstrukcinės dalys yra: pagrindas su važiavimo mechanizmu, prie kurio pritvirtinti du hidrauliniai cilindrai, sujungti su teleskopine kolona, prie kurios lankstu prijungtas roboto galinis vykdymo įtaisas – vakuuminis griebtuvas. Šis robotas gali atlikti tokius judesius: 1) įrenginys gali judėti horizontaliu pagrindu; 2) hidrauliniai cilindrai turi linijinę eigą, o jiems judant susidaro teleskopinės kolonos kampinis poslinkis; 3) teleskopinės kolonos linijinė eiga; 4) vakuuminio griebtuvo kampinis poslinkis.

### **3.2. Prototipo kinematika ir modernizavimo gairės**

Kinematinėse schemose (3.2 pav.) roboto grandys pažymėtos apskritimuose esančiais skaičiais. Grandžių atliekami judesiai pažymėti skirtingomis spalvomis. Raudona spalva pažymėti roboto prototipo aktyvūs judesiai, kuriems esant susidaro papildomas judesys, pažymėtas mėlyna spalva. Keičiant roboto cilindro poslinkį, automatiškai pasikeičia kampo dydis tarp teleskopinės kolonos ir roboto pagrindo.

Atliekant sekančiuose skyriuose aprašytus tyrimus, buvo nagrinėjamos cilindro ir teleskopinės kolonos poslinkių charakteristikos ir vakuuminio griebtuvo posūkio charakteristika, kai roboto prototipas yra atitinkamu atstumu nuo lango rėmo.

Dabartinis roboto *XX 100* prototipas valdomas rankiniu būdu, todėl instaliuojant stiklo paketą žmogus įrenginio grandžių judesius valdo rankiniu būdu. Kiekviena šio prototipo judanti grandis valdoma atskirai, todėl siekiant stiklo paketą montuoti tiksliai ir jo nepažeidžiant, roboto operatorius turi būti ypač atidus ir su robotu atlikti nemažai pasikartojančių judesių. Toks lango montavimo būdas yra labai sudėtingas ir užimantis daug laiko. Dėl šių priežasčių, siekiama, kad stiklas būtų montuojamas automatizuotu būdu, roboto operatoriui paspaudus vos vieną mygtuką.



**3.2 pav.** Roboto *XX 100* kinematinės schemas: a) roboto prototipo ; b) tiriamojo modelio

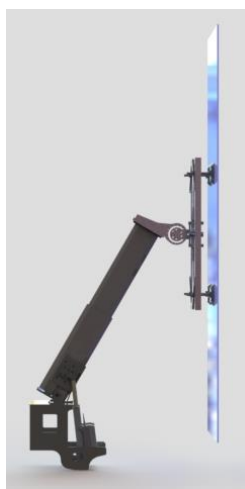
## 4. ROBOTO XX 100 REVERSINIS DARBINIŲ JUDESIŲ KINEMATIKOS TYRIMAS

### 4.1. Tyrimo metodika

Dėl sudėtingo roboto judesių skaičiavimo, tiriami nes visi galimi roboto grandžių judesiai. Nagrinėjami prototipo judesiai: hidraulinių cilindrų ir teleskopinės kolonos poslinkiai ir vakuuminio griebtuvo posūkis, roboto važiavimas horizontaliai nevertinamas. Atliekant roboto kinematikos tyrimus priimama prielaida, kad robotas jau yra tam tikru atstumu prie lango montavimo vietos, o stiklo paketas pasuktas tam tikru kampu, kad jį būtų galima įstatyti į reikiamą vietą. Tyrimams atlikti naudojamas programos *SolidWorks* priedas *Motion Analysis*. Atliekami du tyrimai: roboto reversinis ir tiesioginis darbinių judesių kinematikos tyrimai. Lango paketo montavimo laikas yra 60 sekundžių. Kai kurie tyrimų rezultatai apdoroti *Excel* programa.

### 4.2. Tiriamojo modelio sudarymas

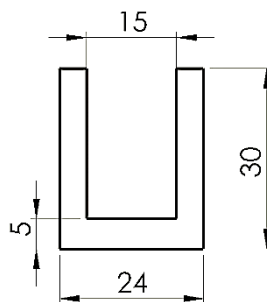
Tyrimams atlikti sudarytas supaprastintas roboto modelis. Šis modelis sudarytas naudojantis *SolidWorks* programa. Tiriamas modelis nuo pilno roboto modelio skiriasi tuo, kad jame nėra elementų ar jų junginių, kurie neturi jokios įtakos skaičiavimams. Naudojamas supaprastintas modelis, atsižvelgiant į kompiuterio, su kuriuo atliekami tyrimai, parametrus ir ilgą atliekamų skaičiavimų laiką. Roboto prototipo skaičiuojamojo modelio vaizdas pateiktas 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Roboto modelis programos *SolidWorks* aplinkoje

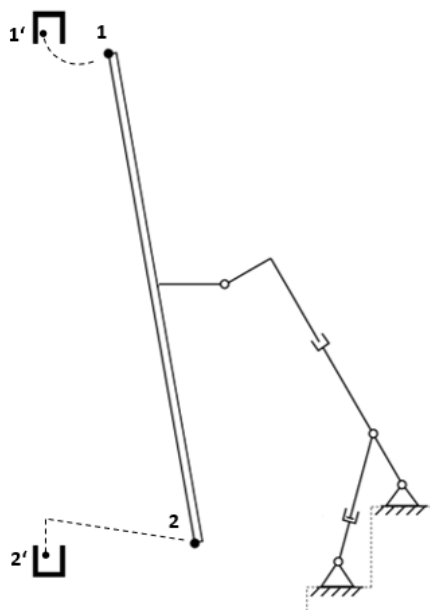
### 4.3. Stiklo paketo charakteringų taškų judėjimo trajektorijų nustatymas jį montuojant

Stiklo paketo charakteringų taškų (viršutinio ir apatinio) judėjimo dėsnis sudaromas žinant lizdą, į kuriuos jis montuojamas geometriją ir pradinę padėtį, nuo kurios pradedamas stiklo įstatymo procesas. Šių taškų trajektorijos turi būti tokios, kad montažo metu stiklas nekirstų lizdų, į kuriuos jis montuojamas, kontūrų (4.2 pav.).



4.2 pav. Lizdo matmenys

Sudarius supaprastintą tiriamąjį modelį, nustatyta, kokiais roboto grandžių judesiais stiklo paketas bus įstatomas į lango rėmą. Numatyta, kad stiklo viršutinė dalis įstatoma į rėmą judant nurodyta kreive, tuo pačiu metu atliekamas ir stiklo apatinės dalies judesys horizontaliai į kairę tol, kol stiklo viršutinė dalis įstatoma į rėmą ir stiklas pasukamas į vertikalią padėtį (4.3 pav.). Stiklo 1 taškas juda punktyru pažymėta kreive, kol pasiekia tašką 1'. Tuo pačiu metu stiklo 2 taškas kyla įstrižai į viršų punktyru pažymėta kreive, kol stiklo taškas 1 pasiekia tašką 1'. Pasiėkus 1' tašką, stiklo 2 taškas pradeda judėti žemyn, t. y. stiklo paketas leidžiamas žemyn iki taško 2', kurį pasiekus, laikoma, kad stiklo paketas pilnai įstatytas į lango rėmą. Stiklo paketo taškų judėjimo kreivės nustatytos eksperimentiniu būdu *SolidWorks* programoje.

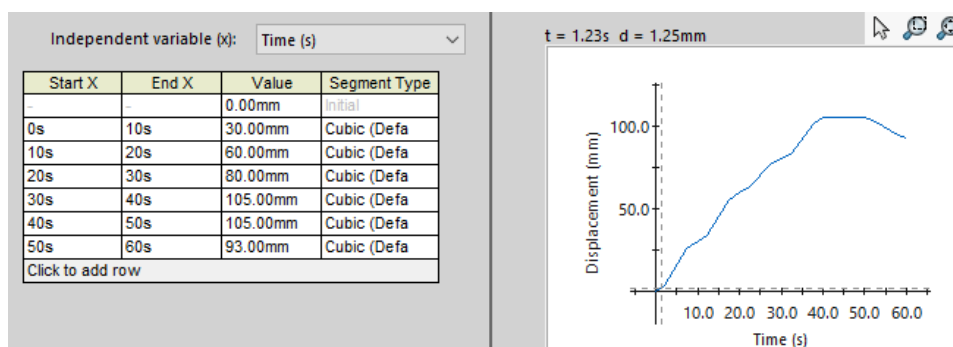


4.3 pav. Stiklo paketo montavimo schema

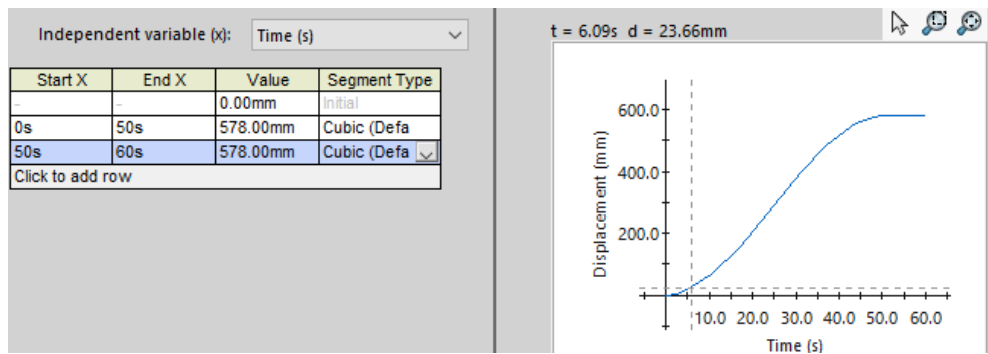
#### 4.4. Roboto judėjimo verifikavimas

Roboto judėjimo verifikavimo tikslas – nustatyti roboto darbinių judesių tikslumo parametrus programoje *SolidWorks*, su kuriais atliekant tolimesnius kinematikos tyrimus būtų gautas kuo sklandesnis roboto grandžių judėjimas.

Pirmiausiai buvo atlikta atvirkštinė roboto darbinių judesių kinematinė analizė, kai lango paketo viršutinio taško judėjimas trajektorija yra suskaidytas į šešis laiko intervalus. Per šiuos laiko intervalus, taškas atlieka parametruose nustatytus poslinkius (4.4 pav.). Lango paketo apatinio taško judėjimas atliekamas per vieną laiko intervalą, antras laiko intervalas duotas tam, kad leidžiant stiklą žemyn, per pirmas 50 sekundžių taško atlikto poslinkio vertė nekistų (4.5 pav.).



4.4 pav. Lango paketo viršutinio taško judėjimo dėsnis



**4.5 pav.** Lango paketo apatinio taško judėjimo dėsnis

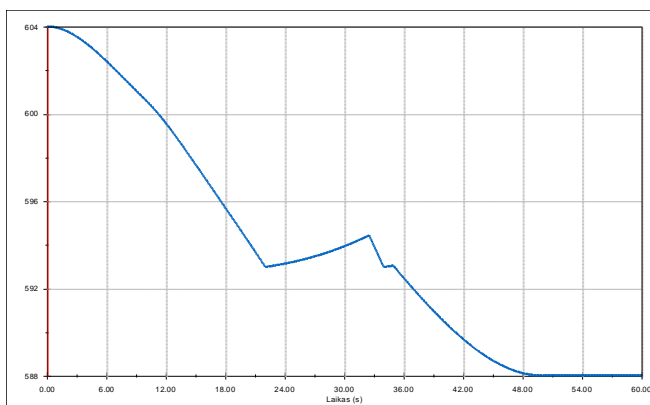
Roboto judėjimo verifikavimas atliktas pasirenkant skirtingą kadrų skaičių per sekundę ir keičiant *SolidWorks* priedo *Motion Analysis* skaičiavimo tikslumo parametą. Šiam tyrimui pasirinkti keturi skirtingi tikslumo parametų variantai (4.1 lent.).

**4.1 lentelė.** Tikslumo parametų variantai

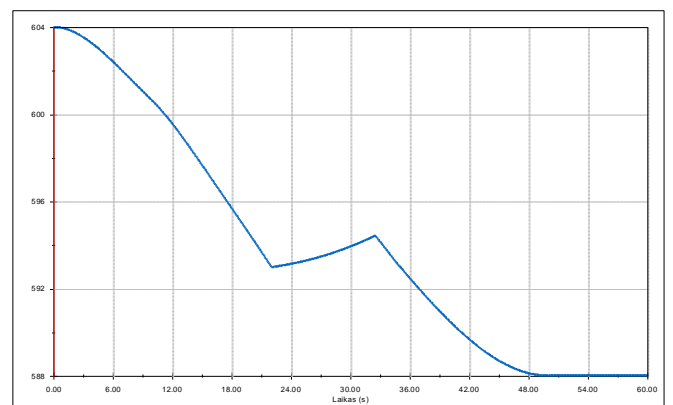
Variantas	Kadrų skaičius per sekundę	Tikslumas
1.	25	0,0001
2.	25	0,000001
3.	50	0,0001
4.	50	0,0000001

Pirmo ir antro tikslumo variantų skaičiavimo rezultatai pateikti 4.6-4.8 paveiksluose.

Cilindro suminio linijinio poslinkio diagramos, kai kadrų skaičius per sekundę yra 25, pateiktos 4.6 paveiksle.



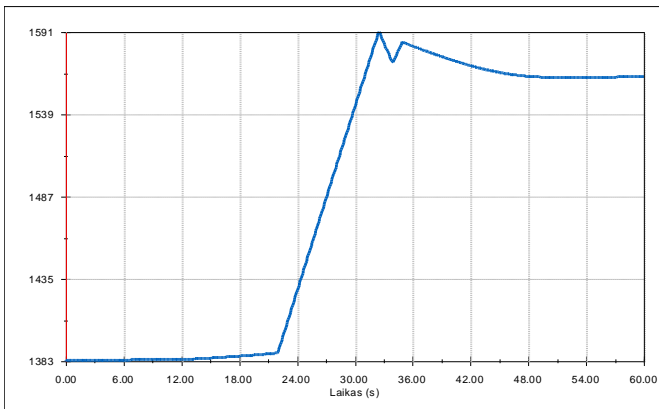
a)



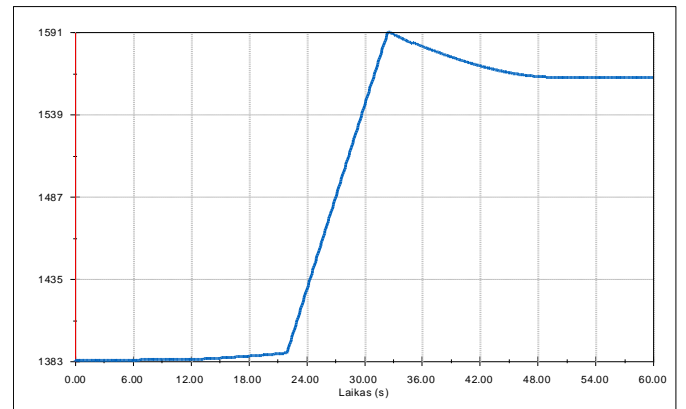
b)

**4.6 pav.** Cilindro suminio linijinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001

Teleskopinės kolonos suminio linijinio poslinkio diagramos, kai kadru skaičius per sekundę yra 25, pateiktos 4.7 paveiksle.



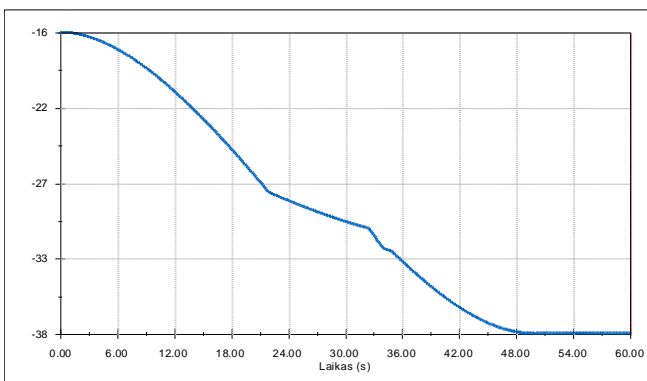
a)



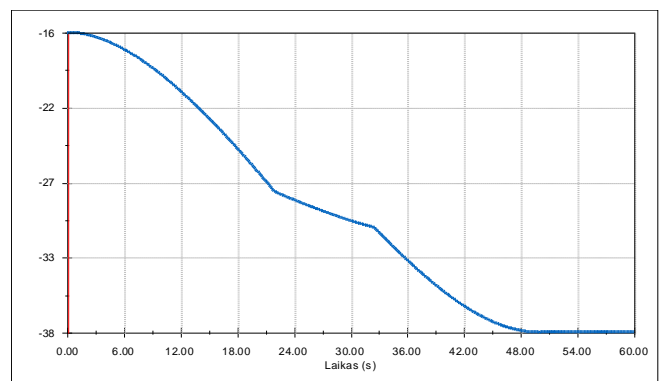
b)

**4.7 pav.** Teleskopinės kolonos suminio linijinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001

Griebtuvo suminio kampinio poslinkio diagramos, kai kadru skaičius per sekundę yra 25, pateiktos 4.8 paveiksle.



a)



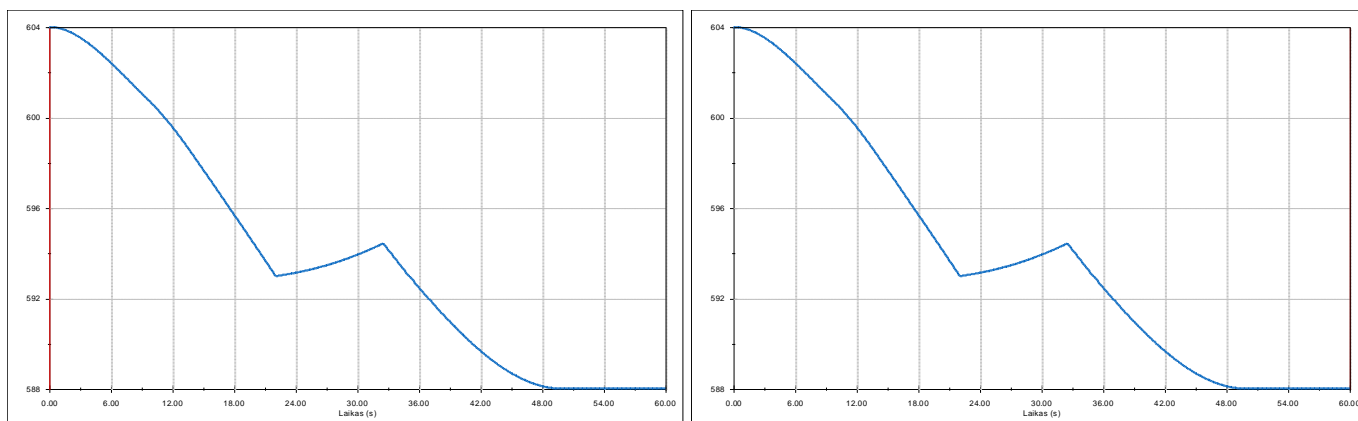
b)

**4.8 pav.** Griebtuvo suminio kampinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001



Trečio ir ketvirto tikslumo variantų skaičiavimo rezultatai pateikti 4.9-4.11 paveiksluose.

Cilindro suminio linijinio poslinkio diagramos, kai kadrų skaičius per sekundę yra 50, pateiktos 4.9 paveiksle.

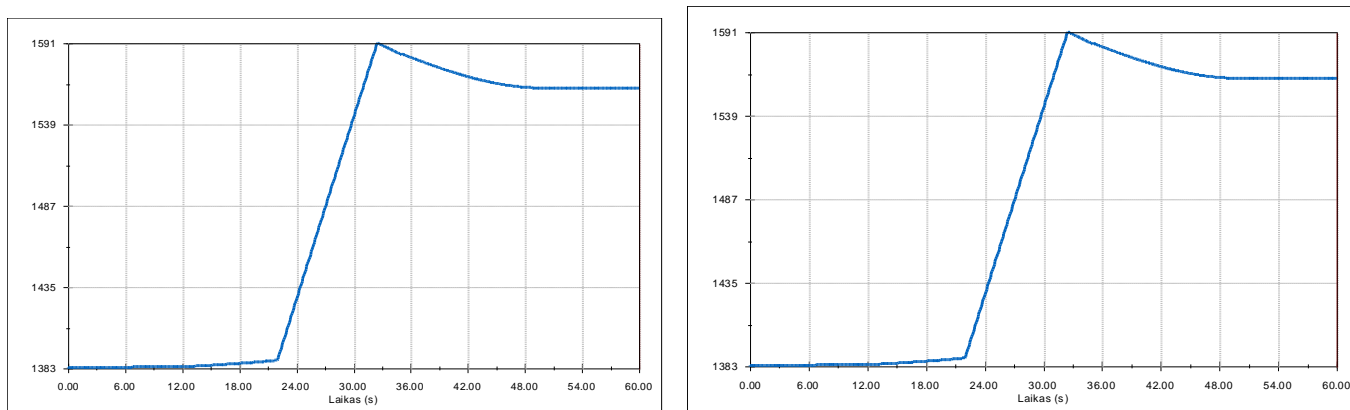


a)

b)

**4.9 pav.** Cilindro suminio linijinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001

Teleskopinės kolonos suminio linijinio poslinkio diagramos, kai kadrų skaičius per sekundę yra 50, pateiktos 4.10 paveiksle.

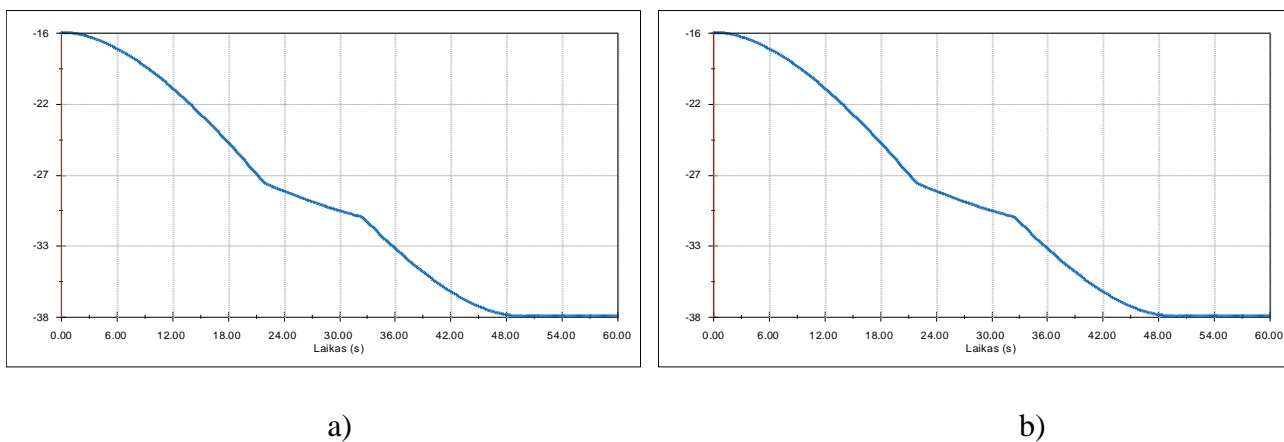


a)

b)

**4.10 pav.** Teleskopinės kolonos suminio linijinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001

Griebtuvo suminio kampinio poslinkio diagramos, kai kadru skaičius per sekundę yra 50, pateiktos 4.11 paveiksle.



**4.11 pav.** Griebtuvo suminio kampinio poslinkio diagramos: a) tikslumas 0,0001; b) tikslumas 0,000001

Roboto grandžių judėjimo trajektorijų tikslumas kito, kai kadru skaičius per sekundę buvo 25. Nustačius 50 kadru skaičiaus per sekundę dažnį, tikslumo parametras *Accuracy* neturėjo įtakos trajektorijų tikslumui. Kitas parametras, darantis didelę įtaką trajektorijų tikslumui yra judesiui atlikti skirto laiko suskaidymas į intervalus, todėl reversinis roboto darbinių judesių kinematikos tyrimas atliktas, roboto grandžių judesiams nustačius po du laiko intervalus.

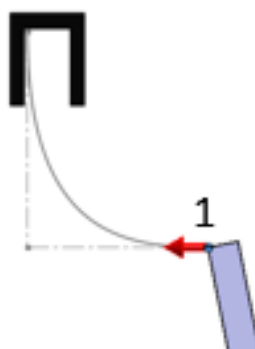
#### **4.5. Roboto XX 100 darbinių judesių tyrimas**

Stiklo paketų montavimo roboto reversinė analizė atliekama tikslu surasti reikiamus jo variklių judėjimo dėsnius siekiant užtikrinti stiklo paketo kontrolinių taškų (viršutinio ir apatinio) judėjimo trajektorijas kaip aprašyta 4.2 skyrelyje.

*SolidWorks* programoje lango paketo 1 ir 2 taškams nurodytos judesių kryptys ir judėjimo parametrai.

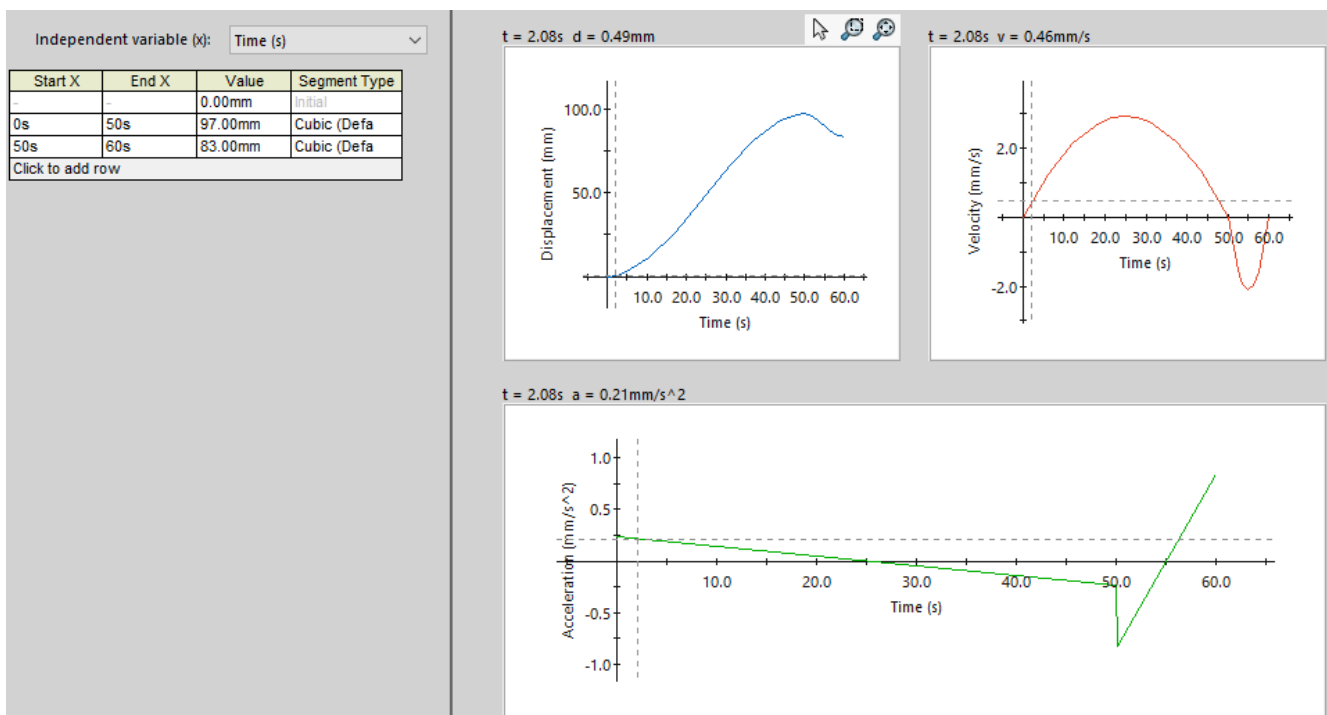
##### **Viršutinio stiklo paketo taško judėjimo trajektorija**

Programoje *SolidWorks* sukuriamas ryšys, jungiantis viršutinį stiklo 1 tašką su nubrėžta kreive, tai reiškia, kad viršutinė stiklo dalis galės judėti tik nubrėžtos kreivės trajektorija (4.12 pav.).



**4.12 pav.** Viršutinės stiklo dalies eksperimentinė judėjimo trajektorija

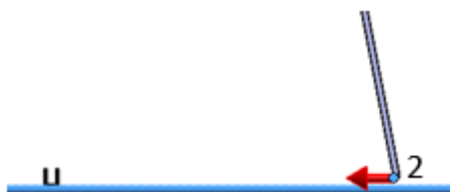
Nustačius viršutinės stiklo dalies judėjimo trajektoriją, nurodyti judėjimo parametrai (4.13 pav.). Lango paketo montavimui skirtas laikas yra 60 s. Per šį laiką viršutinės stiklo dalies taškas 1 turi pasislinkti 97 mm nurodyta trajektorija ir 13 mm ta pačia trajektorija pasislinkti atgal, kad stiklo paketas būtų visiškai įstatytas į lango rėmą. Tokiu būdu nustatomas viršutinės stiklo dalies judėjimo dėsnis.



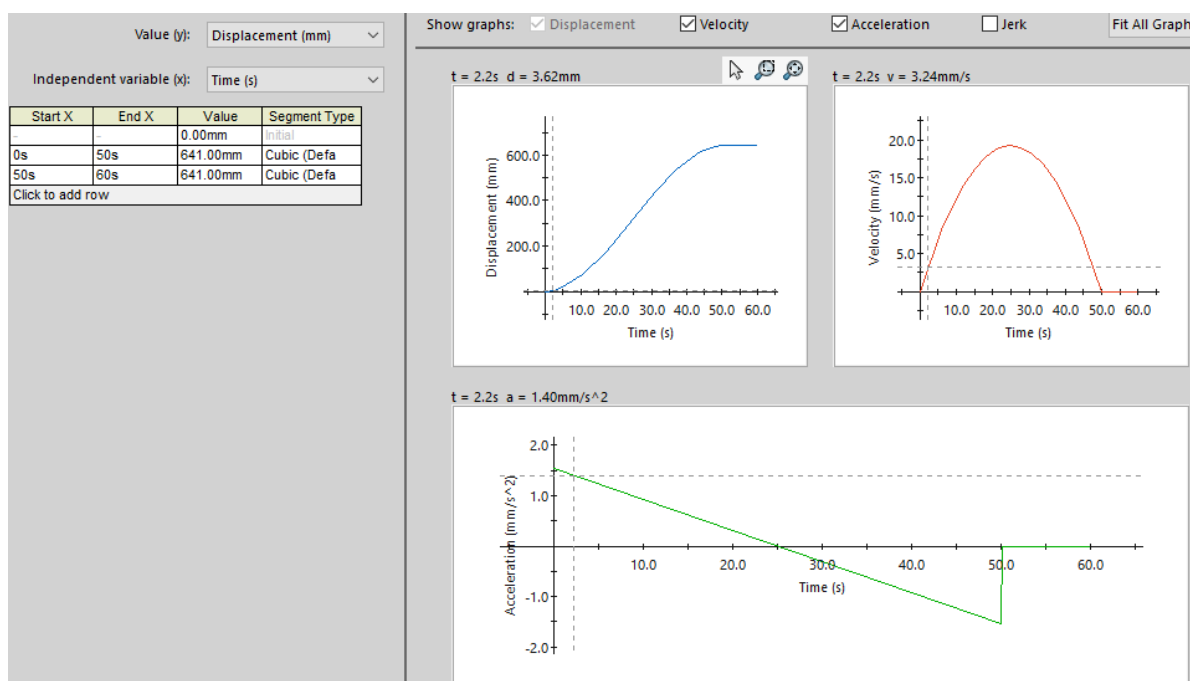
**4.13 pav.** Viršutinės stiklo dalies taško 1 judėjimo dėsnis

## Apatinio stiklo paketo taško judėjimo trajektorija

Apatinės stiklo dalies taškui parenkamas linijinis poslinkis pagrindo, ant kurio stovi robotas, horizontalia kryptimi (4.14 pav.). Nurodomas apatinės lango dalies 2 taško 641 mm poslinkis x ašimi per 50 sekundžių (4.15 pav.). Šis judesys atliekamas kartu su viršutinės stiklo dalies judesiu.



4.14 pav. Apatinės stiklo dalies taško 2 judėjimo kryptis



4.15 pav. Apatinės stiklo dalies judėjimo dėsnis

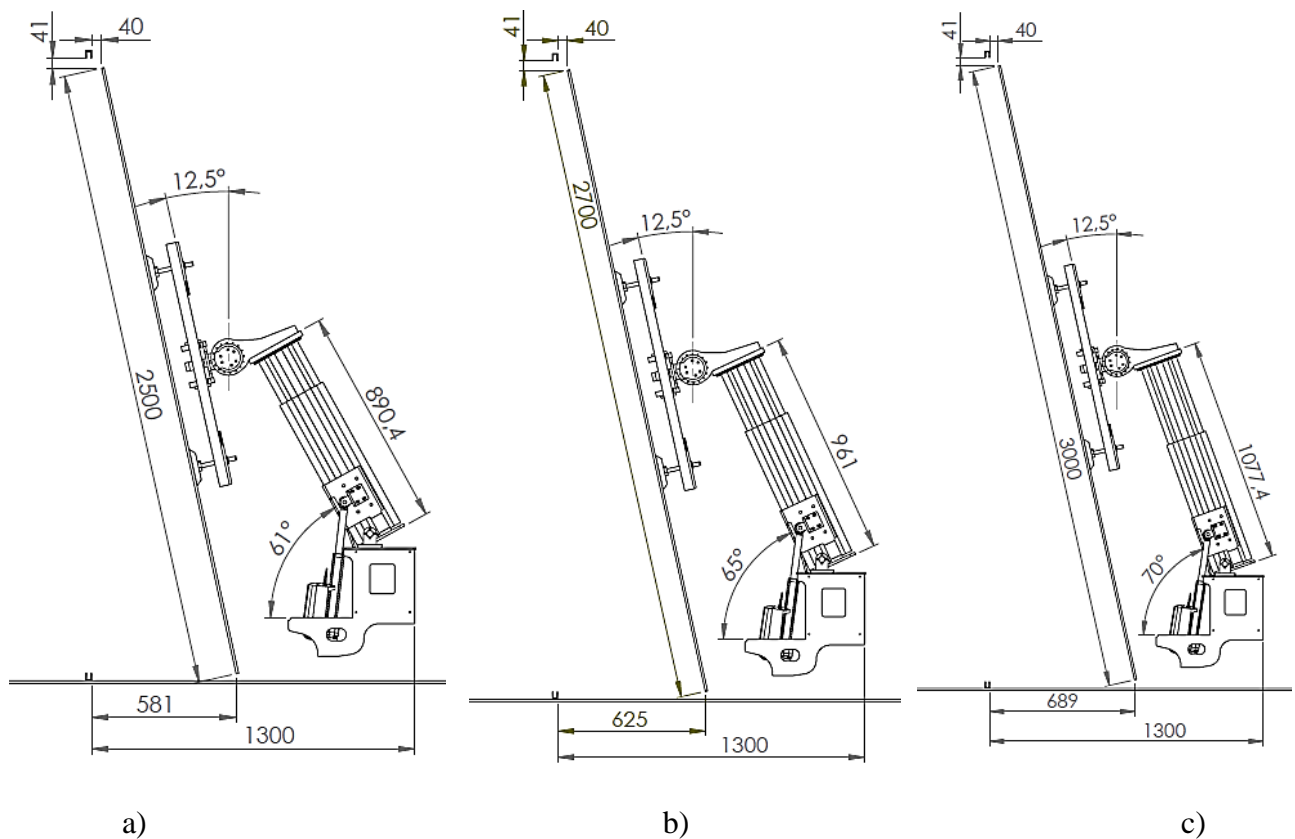
Atlikus roboto prototipo reversinį darbinių judesių tyrimą, gautos stiklo 1 ir 2 taškų judėjimo trajektorijos (4.16 pav.). Iš šių kreivių matyti, kad stiklo viršutinė dalis kyla aukštyn tokia pačia trajektorija kaip ir eksperimentiškai nurodyta trajektorija. Apatinis stiklo taškas 2 iš pradžių leidžiasi žemyn, po to pradeda kilti aukštyn, pasiekus galimą aukščiausią tašką, vertikalčiai leidžiasi žemyn.



**4.16 pav.** Tyrimo metu gautos stiklo paketo taškų 1 ir 2 judėjimo trajektorijos

Pirmiausiai skaičiavimai atlikti, kai stiklo paketo aukštis yra 2700 mm. Siekiant sužinoti, kaip kinta roboto grandžių judėjimo dėsniai, atlikti skaičiavimai esant dar dviem skirtingiems stiklo paketų aukščiams: 2500 mm ir 3000 mm.

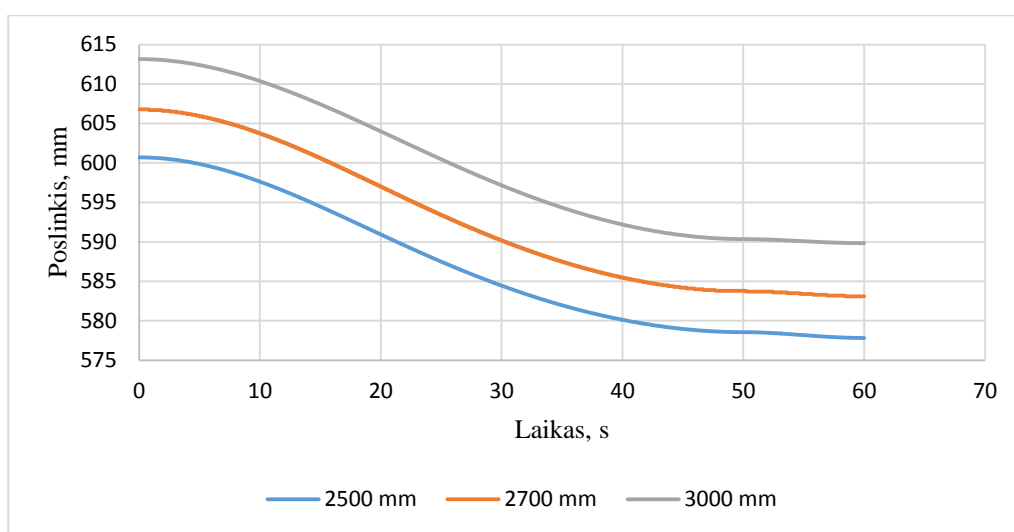
Daroma prielaida, kad visais trimis atvejais stiklo paketo posūkio kampas prieš montavimo procesą nustatomas vienodas, šiuo atveju  $12,5^\circ$ . Atstumas nuo stiklo paketo viršaus iki lango rėmo taip pat visais atvejais yra vienodas – x kryptimi 40 mm, y kryptimi 41 mm. Atstumas x kryptimi nuo roboto pagrindo iki lango rėmo visais atvejais yra 1300 mm (4.17 pav.).



**4.17 pav.** Skirtingų aukščių stiklo paketų padėtys, kai stiklo paketų aukščiau yra: a) 2500 mm; b) 2700 mm; c) 3000 mm.

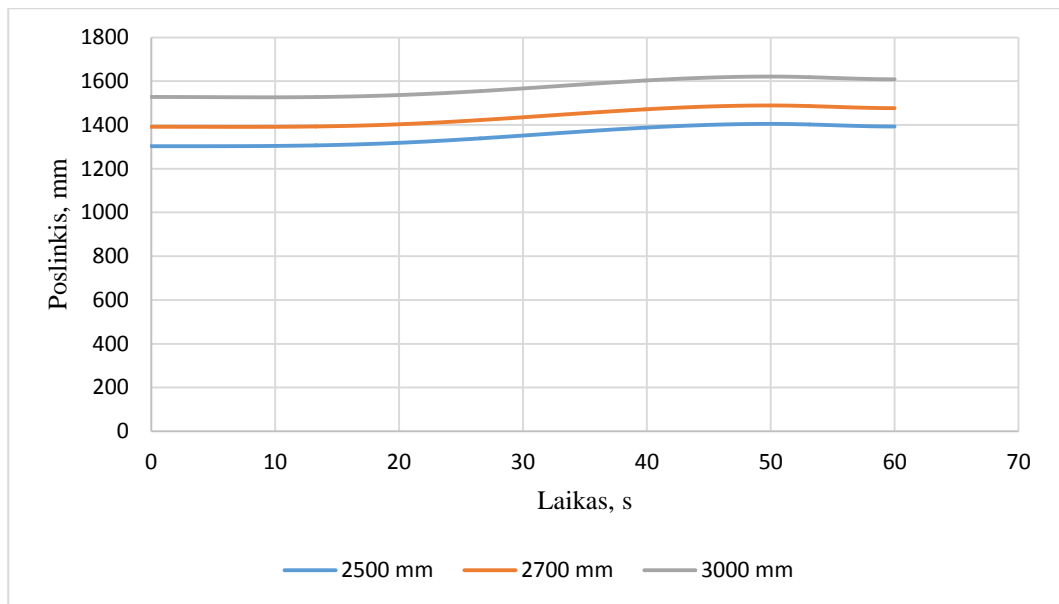
**Rezultatai lokaliajose koordinacijose**, esant skirtingiems stiklo paketų aukščiams pateikti 4.18-4.20 paveiksluose.

Cilindro poslinkio priklausomybės nuo laiko grafike (4.18 pav.) pateiktos cilindro suminio poslinkio charakteristikos, kai stiklo paketo aukštis yra 2500 mm, 2700 mm ir 3000 mm. Iš grafiko matyti, kad visais atvejais poslinkio vertės priklausomai nuo laiko pasiskirsto tokiu pačiu dėsningumu. Cilindro poslinkis yra mažėjantis, o 50-60 s laiko intervale poslinkis mažėja tiesiškai. Kai stiklo paketo aukštis yra 2500 mm, cilindro eiga yra 22,9 mm. Esant stiklo paketo aukščiui 2700 mm, cilindro eiga yra 23,7 mm, o kai stiklo paketo aukštis yra 3000 mm, cilindro eiga yra 23,3 mm.



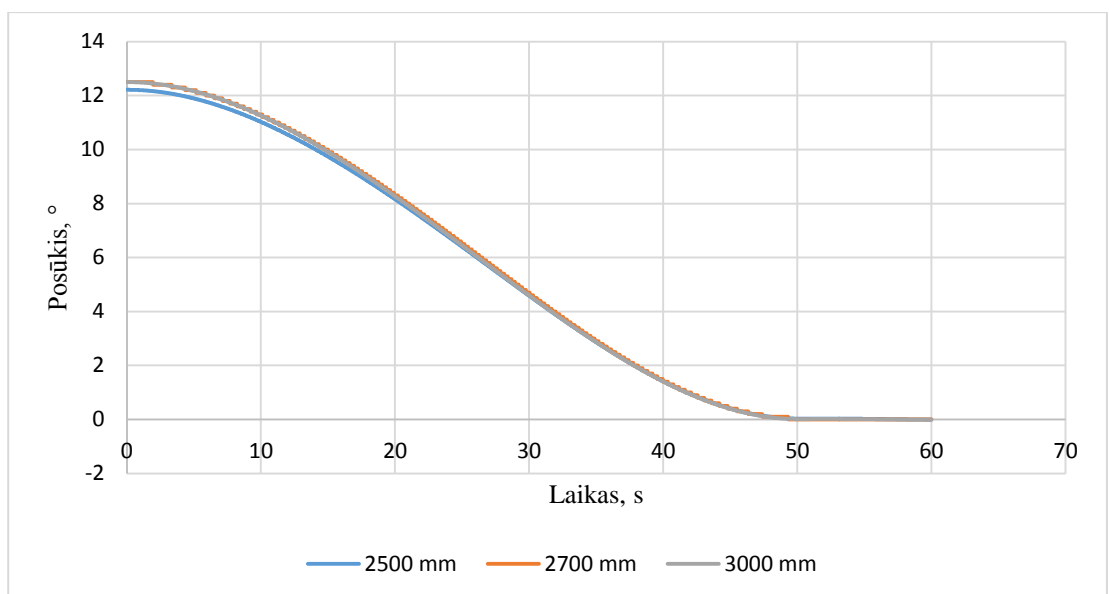
**4.18 pav.** Cilindro suminio poslinkio priklausomybės nuo laiko grafikas

Teleskopinės kolonos poslinkio priklausomybės nuo laiko grafike (4.19 pav.) pateiktos teleskopinės kolonos suminio poslinkio charakteristikos, montuojant skirtingo aukščio stiklo paketus. Iš gauto grafiko matyti, kad teleskopinės kolonos poslinkis visais atvejais didėja pirmąsias 50 sekundžių, o likusias 10 sekundžių tiesiškai mažėja. Kai stiklo paketo aukštis yra 2500 mm, teleskopinės kolonos didžiausia poslinkio eiga yra 93,3 mm, o mažiausia – 90 mm. Kai aukštis yra 2700 mm, teleskopinės kolonos didžiausia poslinkio eiga yra 97,4 mm, o mažiausia – 85,15 mm. Kai aukštis 3000 mm, didžiausia eiga yra 102 mm, o mažiausia – 80,7 mm.



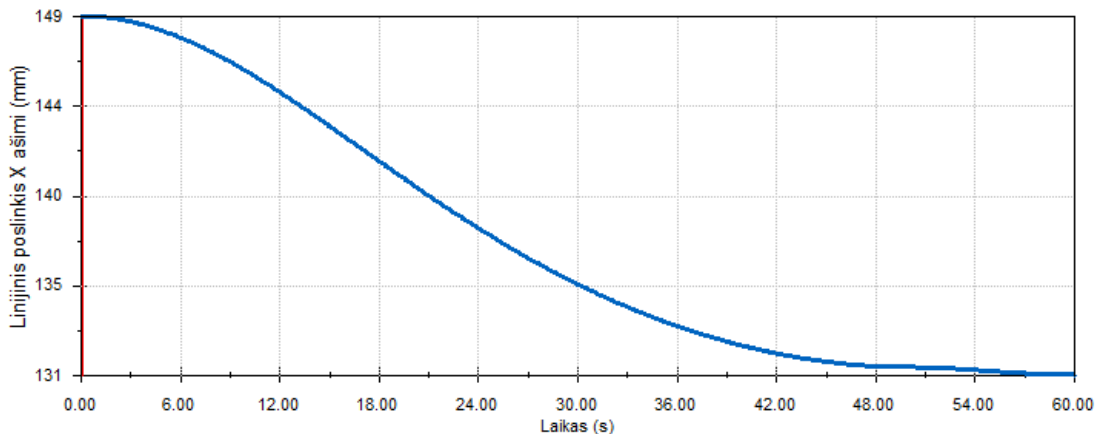
**4.19 pav.** Teleskopinės kolonos suminio poslinkio priklausomybės nuo laiko grafikas

Griebtuvo posūkio priklausomybės nuo laiko grafike (4.20 pav.) pateiktos griebtuvo suminio posūkio charakteristikos, montuojant skirtingo aukščio stiklo paketus. Iš grafiko matyti, kad stiklo paketo aukščiui esant 2700 mm ir 3000 mm, posūkio priklausomybė nuo laiko yra vienoda. Abiem atvejais griebtuvas stiklo paketą per 50 sekundžių pasuka beveik  $13^\circ$ . Kai stiklo paketo aukštis yra 2500 mm, griebtuvas per 50 sekundžių stiklą pasuka  $12,2^\circ$ .

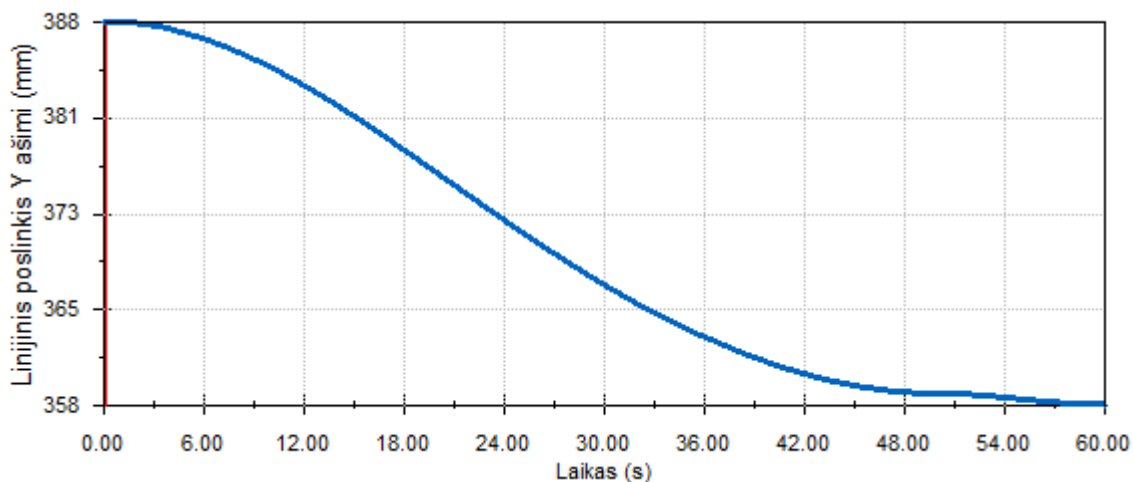


**4.20 pav.** Griebtuvo suminio posūkio priklausomybės nuo laiko grafikas

**Rezultatai globalioje koordinačių sistemoje**, kai stiklo aukštis yra 2700 mm, pateikti 4.20-23 paveiksluose. Montuojant lango paketą, cilindro eiga x ašimi yra 18 mm (4.21 pav.), y ašimi – 30mm (4.22 pav.). Teleskopinės kolonos eiga x ašimi yra 341 mm (4.23 pav.). Teleskopinės kolonos poslinkis y ašimi pirmąsias 21 s mažėja, nuo 21 s iki 50 s – didėja, o nuo 50 s iki 60 s vėl mažėja (4.24 pav.).

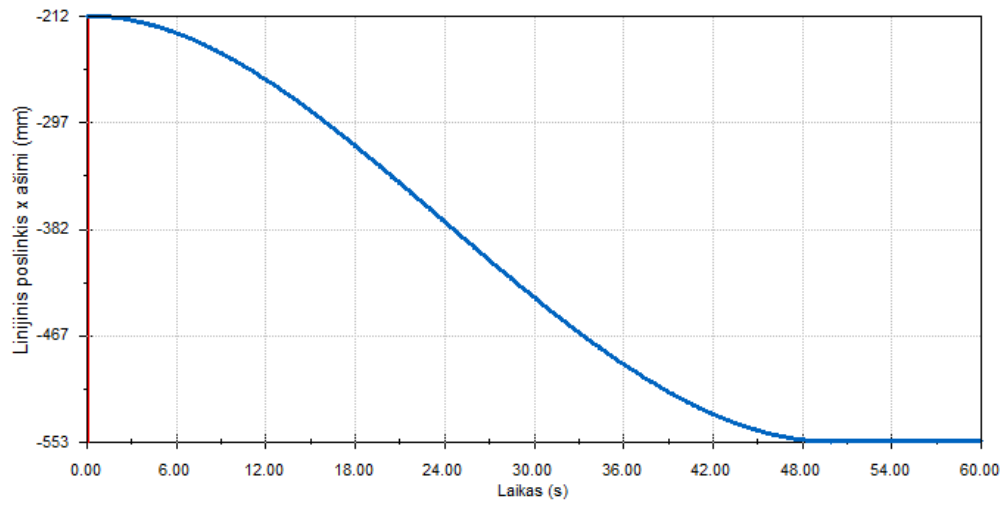


**4.21 pav.** Cilindro poslinkio x ašimi priklausomybės nuo laiko grafikas

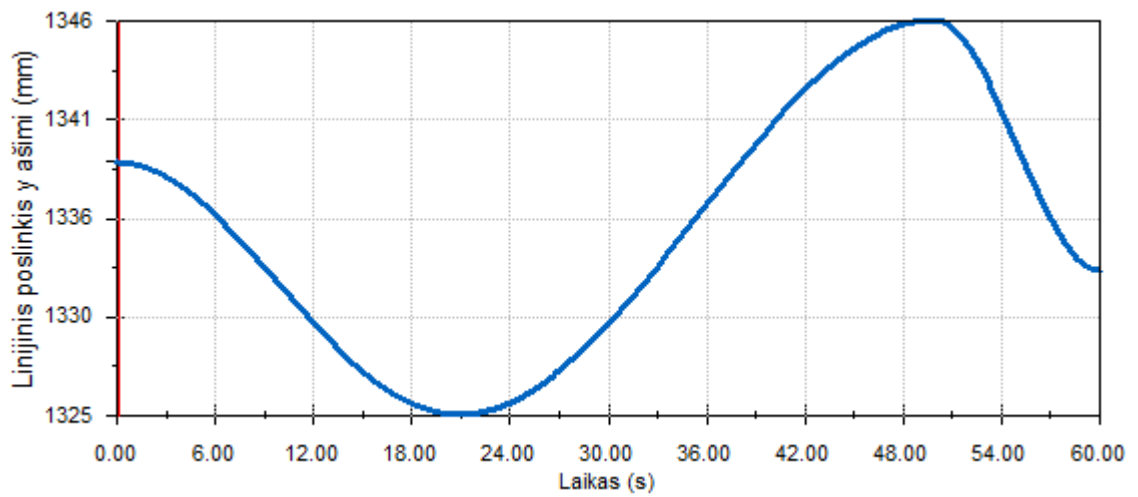


**4.22 pav.** Cilindro poslinkio y ašimi priklausomybės nuo laiko grafikas





**4.23 pav.** Teleskopinės kolonos poslinkio x ašimi priklausomybės nuo laiko grafikas



**4.24 pav.** Teleskopinės kolonos poslinkio y ašimi priklausomybės nuo laiko grafikas

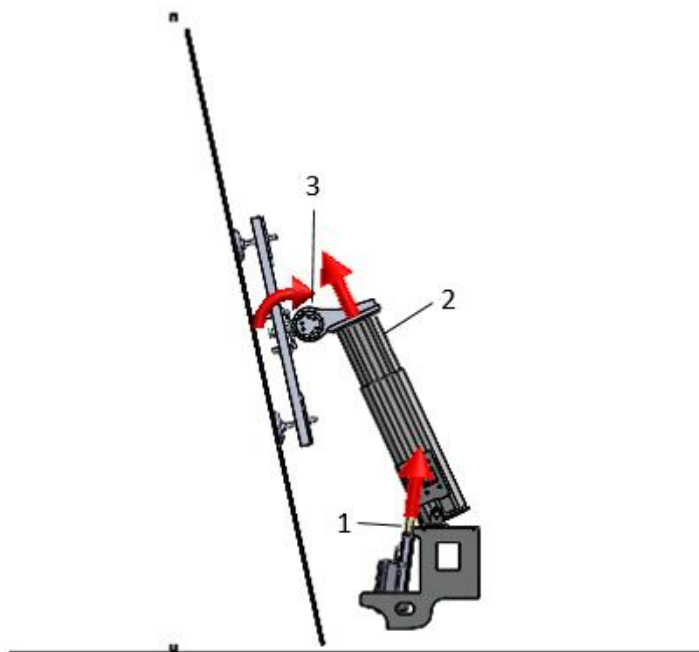
## 5. ROBOTO XX 100 TIESIOGINIS DARBINIŲ JUDESIŲ KINEMATIKOS TYRIMAS

### 5.1. Roboto variklių parametrai

Atlikus reversinį roboto darbinių judesių tyrimą, remiantis gautais rezultatais nustatyti roboto variklių parametrai ir atliktas šiame skyriuje aprašomas tiesioginis roboto darbinių judesių tyrimas. Tyrimas atliktas su *SolidWorks* programos *Motion Analysis* įrankių paketu. Šis tyrimas atliktas, kai stiklo paketo aukštis yra 2700 mm, o instaliavimo laikas numatytas 60 sekundžių.

Remiantis roboto reversinio darbinių judesių kinematikos tyrimo metu gautais roboto grandžių judėjimo dėsniais, nustatyti roboto varikliai (5.1 pav.):

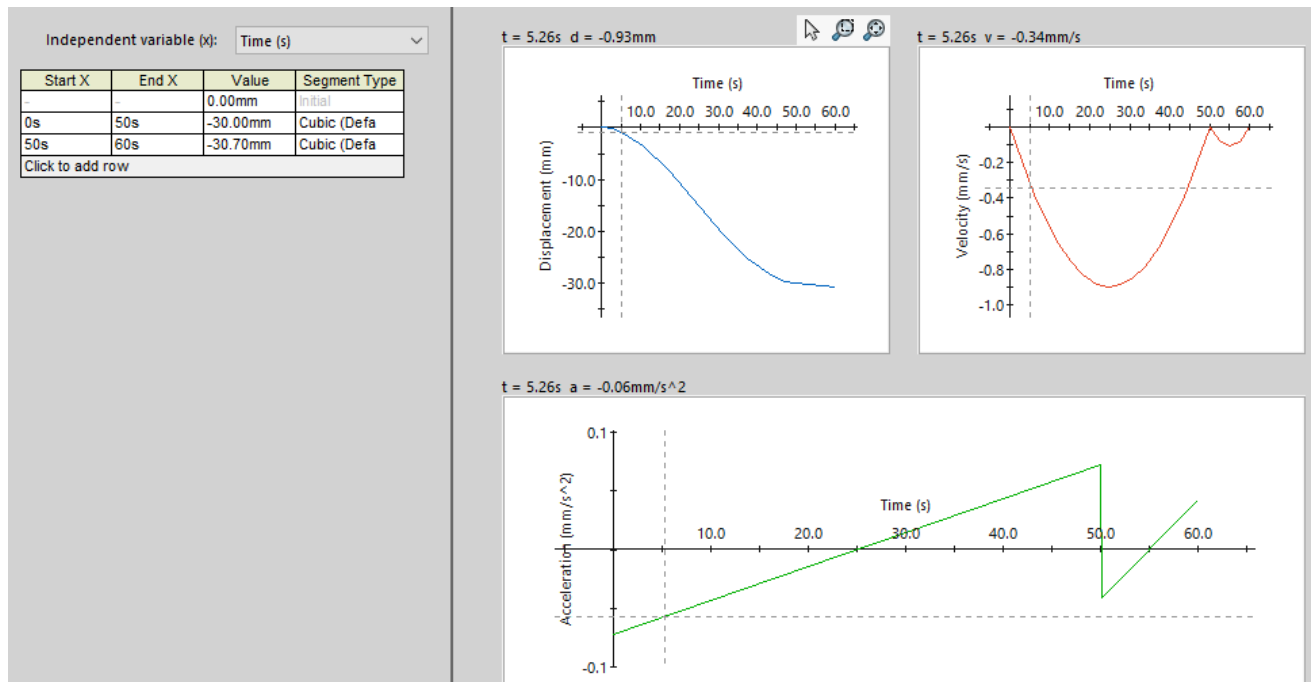
- 1 – cilindro linijinė elektrinė pavara 1 (linijinis judesys);
- 2 – teleskopinės kolonos linijinė elektrinė pavara 2 (linijinis judesys);
- 3 – vakuuminio griebtuvo žingsninis variklis 3 (sukamasis judesys).



5.1 pav. Roboto XX 100 varikliai

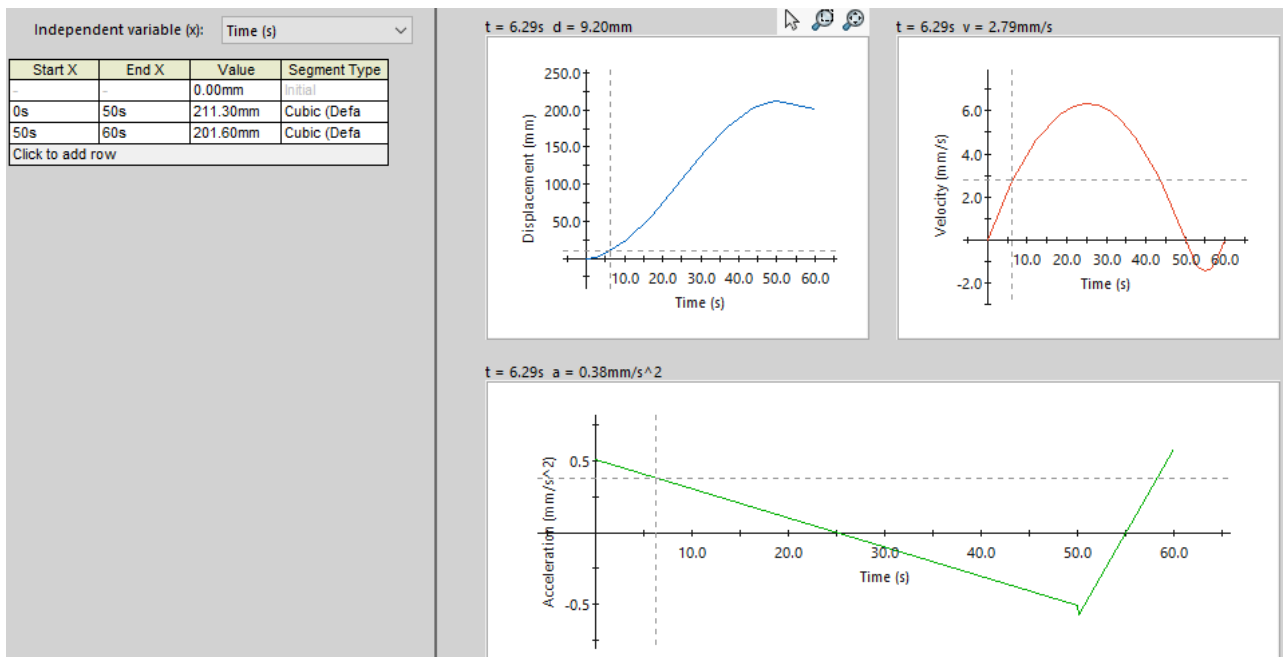
Prieš atliekant roboto prototipo tiesioginį darbinių judesių kinematikos tyrimą, *SolidWorks* programoje robotą valdantiems varikliams įvedamos reversinio tyrimo metu gautos poslinkių ir posūčio vertės ir skaičiavimams parenkamas gravitacijos parametras, kurio vertė yra  $9,80665 \text{ m/s}^2$ .

Cilindro linijinei elektrinei pavarai nustatyti parametrai pateikti 5.2 paveiksle. Šiame paveiksle matyti, kokios susidaro cilindro poslinkio, greičio ir pagreičio priklausomybės nuo laiko, įvedus variklio parametrus.

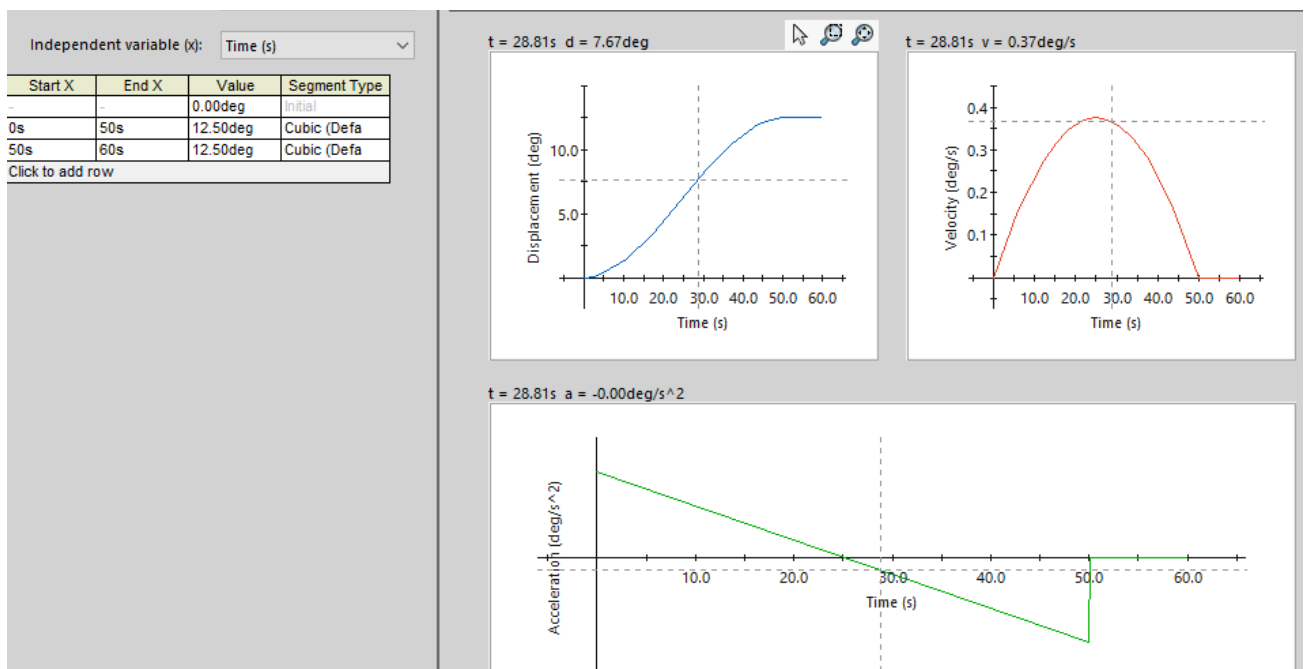


**5.2 pav.** Cilindro linijinės elektrinės pavaros judėjimo parametrai

Teleskopinės kolonos linijinei elektrinei pavarai nustatyti parametrai pateikti 5.3 paveiksle. Šiame paveiksle matyti, kokios susidaro teleskopinės kolonos poslinkio, greičio ir pagreičio priklausomybės nuo laiko, įvedus variklio parametrus. Vakuuminio griebtuvo žingsniniam varikliui nustatyti parametrai pateikti 5.4 paveiksle. Šiame paveiksle matyti, kokios susidaro vakuuminio griebtuvo posūčio, greičio ir pagreičio priklausomybės nuo laiko, įvedus variklio parametrus. Visų variklių judėjimo segmento tipas yra *Cubic*.



5.3 pav. Teleskopinės kolonos linijinės elektrinės pavaros judėjimo parametrai

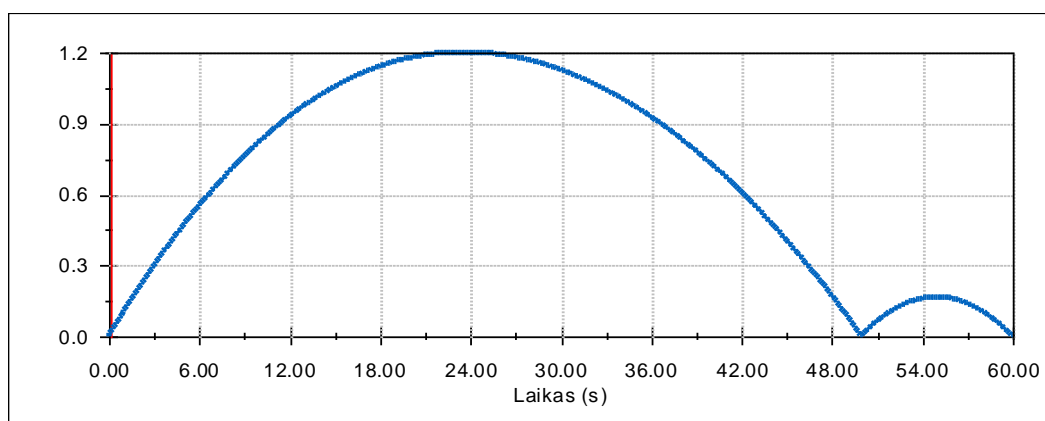


5.4 pav. Vakuuminio griebtuvo žingsninio variklio judėjimo parametrai

## 5.2. Tiesioginio judesių tyrimo rezultatai

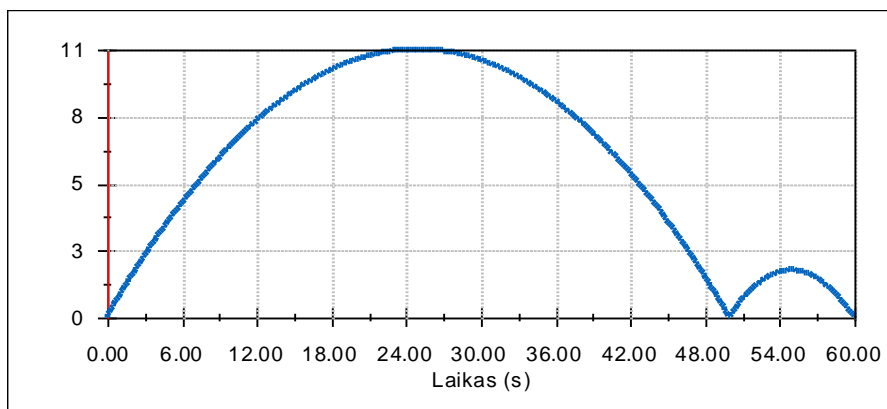
Atlikus tiesioginį roboto *XX 100* darbinių judesių kinematikos tyrimą, nustatyti prototipą valdančių variklių greičiai.

Cilindro linijinės elektrinės pavaros greičio priklausomybės nuo laiko grafikas pateiktas 5.5 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad didžiausias šios pavaros pasiektas greitis yra 1,2 mm/s (0,0012 m/s). Pavaros greitis didėja iki 24-osios sekundės, tada pradeda mažėti iki 50-osios sekundės ir vėl didėja iki 56-osios sekundės, pasiekdamas maždaug 0,2 mm/s (0,0002 m/s) greitį ir vėl mažėja, kol stiklo paketas yra įstatomas į vietą. Pats mažiausias cilindro linijinės elektrinės pavaros greičio kitimas yra 50-60 sekundžių laiko intervale, kai stiklo paketas y kryptimi leidžiamas žemyn, tuo metu ši pavara juda labai nežymiai, nes per 10 sekundžių atlieka 1 mm poslinkį.



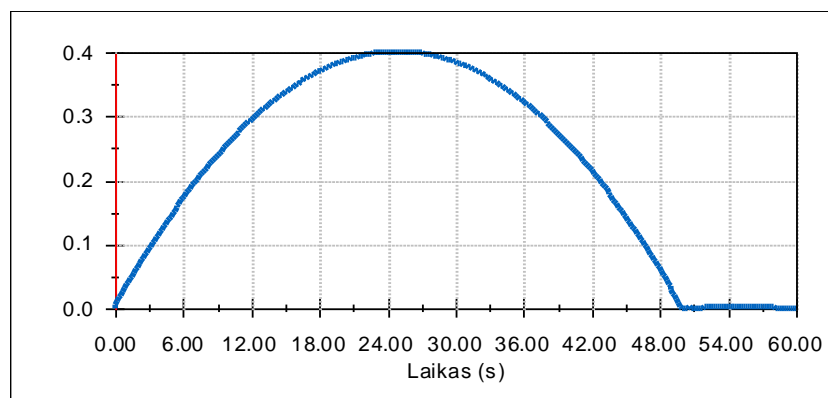
**5.5 pav.** Cilindro linijinės elektrinės pavaros greičio priklausomybės nuo laiko grafikas

Teleskopinės kolonos linijinės elektrinės pavaros greičio priklausomybės nuo laiko grafikas pateiktas 5.6 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad šios pavaros judėjimo dėsnis laike toks pat kaip cilindro linijinės elektrinės pavaros. Teleskopinės kolonos linijinės elektrinės pavaros didžiausias pasiektas greitis yra 11 mm/s (0,011 m/s).



**5.6 pav.** Teleskopinės kolonos linijinės elektrinės pavaros greičio priklausomybės nuo laiko grafikas

Vakuuminio griebtuvo žingsninio variklio kampinio greičio priklausomybės nuo laiko grafikas pateiktas 5.7 paveiksle. Šio variklio didžiausias kampinis greitis yra  $0,4 \text{ }^\circ/\text{s}$ , kuris pasiektas per pirmąsias 24 sekundes, toliau kampinis greitis mažėjo iki 50-osios sekundės. Kampinis greitis montavimo metu yra ypač nedidelis, stiklo paketas iš lėto sukamas per 50 sekundžių, tuo pat metu jį keliant aukštyn.



**5.7 pav.** Vakuuminio griebtuvo žingsninio variklio kampinio greičio priklausomybės nuo laiko grafikas

## IŠVADOS

1. Atlikta stiklo montavimą palengvinančių įrenginių apžvalga. Mokslinių tyrimų analizė parodė, kad montavimo darbo našumas didesnis yra montuojant su pusiau automatizuota roboto sistema.
2. Išanalizuota modernizuojamo prototipo konstrukcija, aprašyta jo kinematika.
3. Nustatyti robotą valdančių variklių judėjimo dėsniai, kuriais remiantis atliktas roboto reversinis darbinių judesių kinematikos tyrimas.
4. Nustatyti robotą valdančių variklių dėsniai. Nustatyti variklių didžiausi pasiekiami greičiai. Cilindro linijinės elektrinės pavaros didžiausias pasiektas greitis yra 1,2 mm/s (0,0012 m/s), teleskopinės kolonos linijinės elektrinės pavaros – 11 mm/s (0,011 m/s). Vakuuminio griebtuvo žingsninio variklio didžiausias pasiektas kampinio greitis yra 0,4 °/s.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Jakutis, A., Kazlovas, V. ir Kvartūnas, D. Statybos verslo elementai: mokomasis leidinys. Vilnius, 2007, p.78-80.
2. Patentas Nr. US1721816, įregistruotas 1929-06-23, Morris Glazer. [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.google.ch/patents/US1721816>
3. Patentas Nr. US3598263, įregistruotas 1971-08-10, Robert J. Ehmke. [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.freepatentsonline.com/3598263.pdf>
4. Sky Lifter SL 400 vakuuminis keltuvas [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://instant.lt/Produktai/Vakuuminiai-keltuvai/Sky-Lifter-SL-400-vakuuminis-keltuvas>
5. SL 400 Multilifter Sky Lifter [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://en.smartlift.dk/en-GB/Products/SL-400-Sky-Lifter.aspx>
6. Horizon [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.quattrolifts.com/horizon>
7. Forklift Verti-Clad [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ggrglass.co.uk/lifting-equipment/cladding-lifters/forklift-verti-clad-400kg/>
8. GM 2000-26 [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://ergorobotic.com/products/gm-2000-26/>
9. GGR Glass: EMU 300-500 kg [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ggrglass.co.uk/lifting-equipment/glazing-robots/emu-300-500kg/>
10. KS Engineering informacinis leidinys: Lifting equipment that inspires. KS MultiCrawler the all-terrain all-rounder. [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.theglassrackingcompany.com/files/docs/robots/ks%20multicrawler%20brochure.pdf>
11. GMW Cranes and Handling: Winlet 350TH [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://www.winlet.dk/winlet-350-th-2>
12. Winlet Eco Vacuum Lifters [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://winlet.co.uk/winlet-glazing-robot-picture-perfect-says-hire-company-bosses/>
13. Glazing robot hire – get the Winlet Wow Factor [žiūrėta 2016-03-24]. Prieiga per internetą:  
<http://hird.co.uk/glazing-robot-hire-get-winlet-wow-factor/>
14. Saint-Gobain Glass: Installation [žiūrėta 2016-10-15]. Prieiga per internetą:



<http://uk.saint-gobain-glass.com/trade-customers/installation>

15. Aluplast: Bonding inside – įklijuojamo stiklo paketo technologija [žiūrėta 2016-10-15].  
Prieiga per internetą:  
<http://www.aluplast.com.pl/lt/bonding-inside-klijuojamo-stiklo-paketo-technologija>
16. Centre for window and cladding technology [žiūrėta 2016-10-15]. Prieiga per internetą:  
<http://www.cwct.co.uk/design/options.htm>
17. Myeong-Su Gil, Min-Sung Kang, Seunghoon Lee, Hee-Don Lee, Kyoo-silk Shin, Ji-Yeong Lee, Chang-Soo Han, Installation of heavy duty glass using an intuitive manipulation device. Automation in Construction An International Journal, 2013, Volume 35, p. 579-586.
18. Seunghoon Lee, Jungil Lee, Chang-Soo Han, Kyeyoung Lee, Sangheon Lee, Human Robot Cooperation Control and Task Planning for a Glass Ceiling Installation Robot. The 25<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARK-2008, Vilnius: Technika, 2008. p. 181-186. ISBN 978-9955-28-329-4
19. Blue Ocean Robotics [žiūrėta 2016-09-17]. Prieiga per internetą:  
<https://blue-ocean-robotics.com/wallmo/>

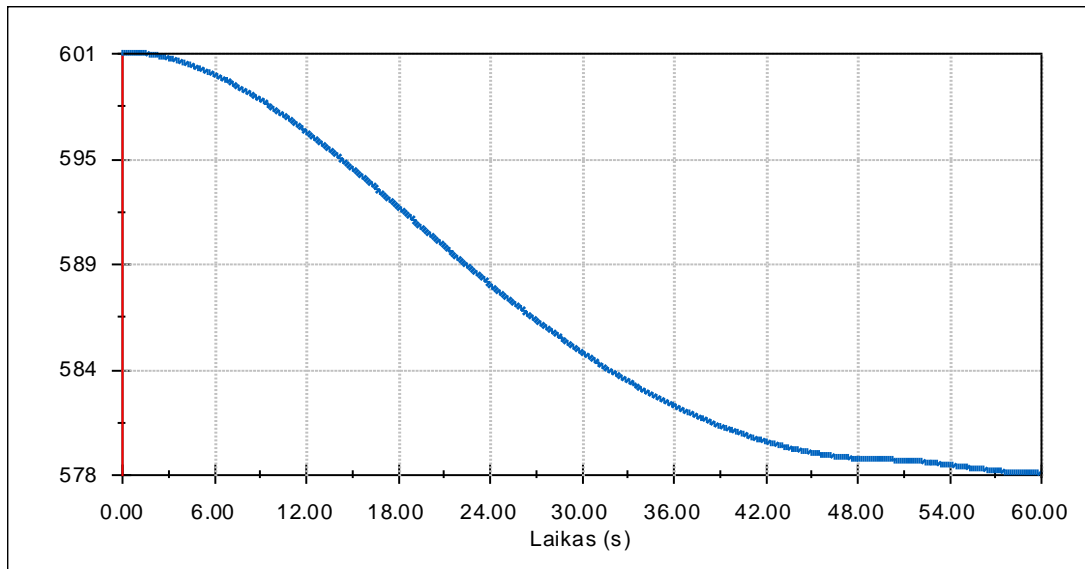
# PRIEDAI

## 1 Priedas. Rezultatai lokaliaje koordinacių sistemoje

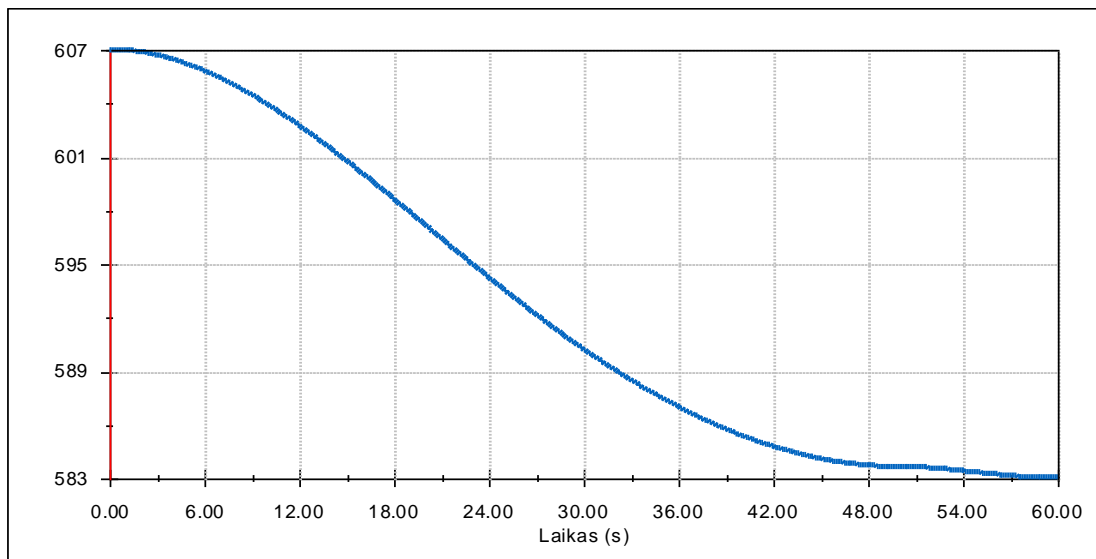
Šiame priede pateikiami reversinio darbinių judesių kinematikos tyrimo rezultatai lokaliaje koordinacių sistemoje, kai stiklo paketų aukščiai yra skirtingi.

### Cilindro poslinkio priklausomybių nuo laiko grafikai

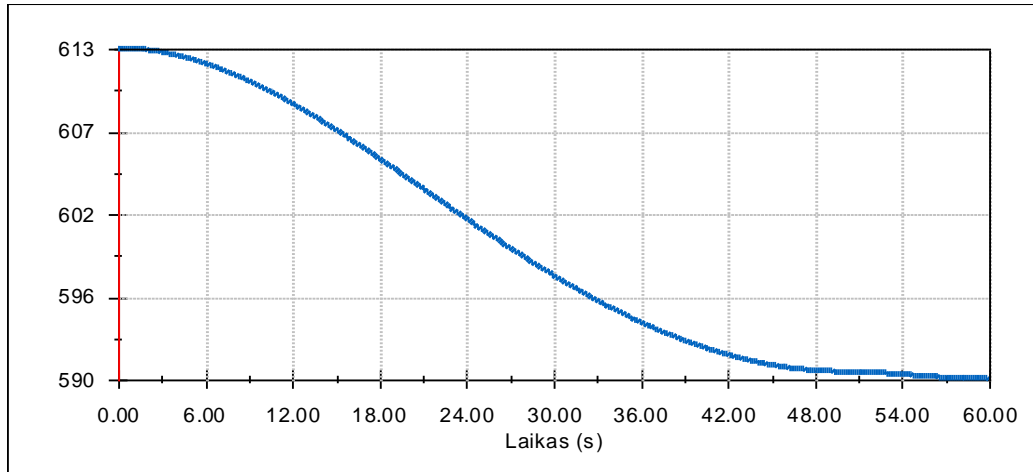
- Stiklo paketo aukštis 2500 mm:



- Stiklo paketo aukštis 2700 mm:

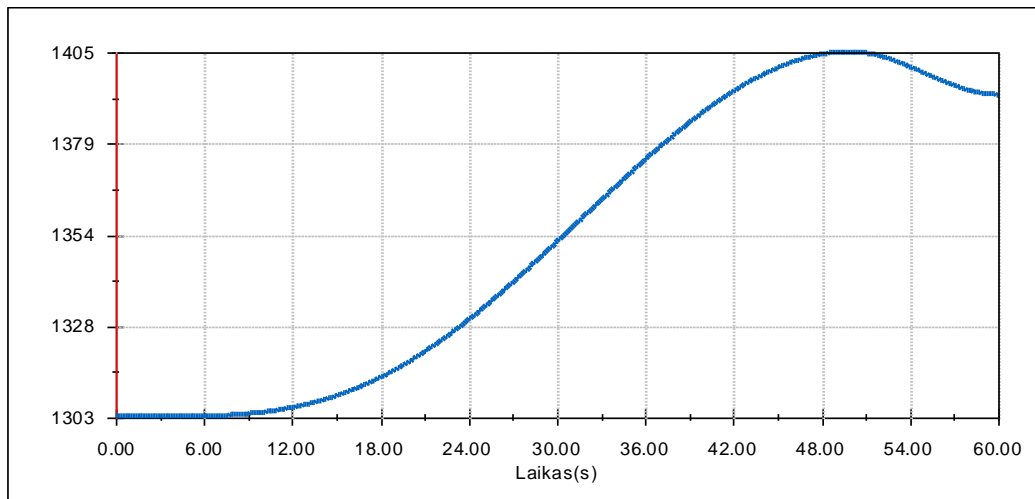


- Stiklo paketo aukštis 3000 mm:

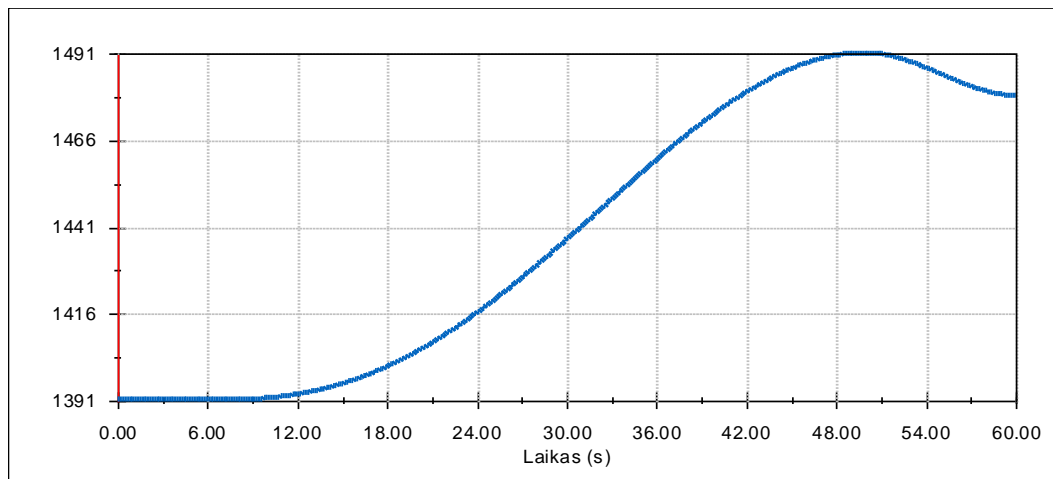


### Teleskopo poslinkio priklausomybių nuo laiko grafikai

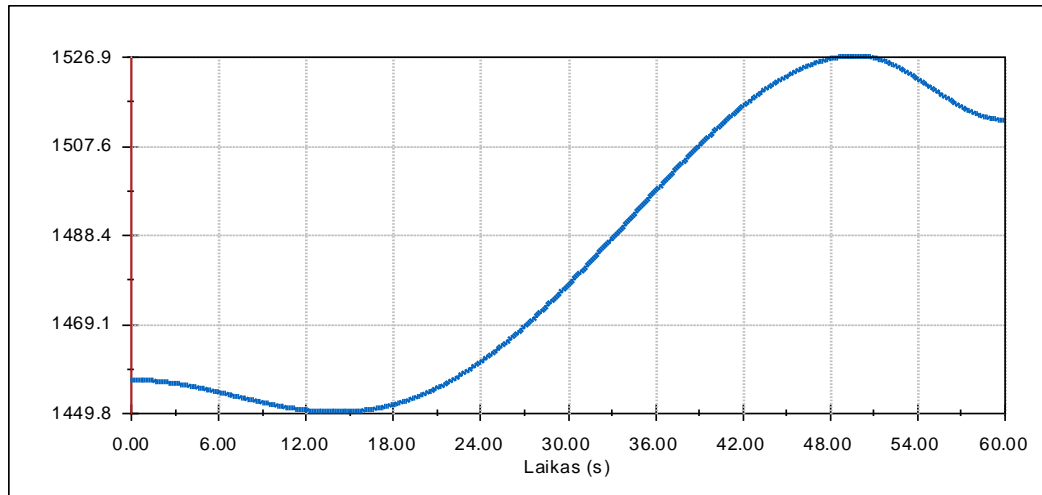
- Stiklo paketo aukštis 2500 mm:



- Stiklo paketo aukštis 2700 mm:

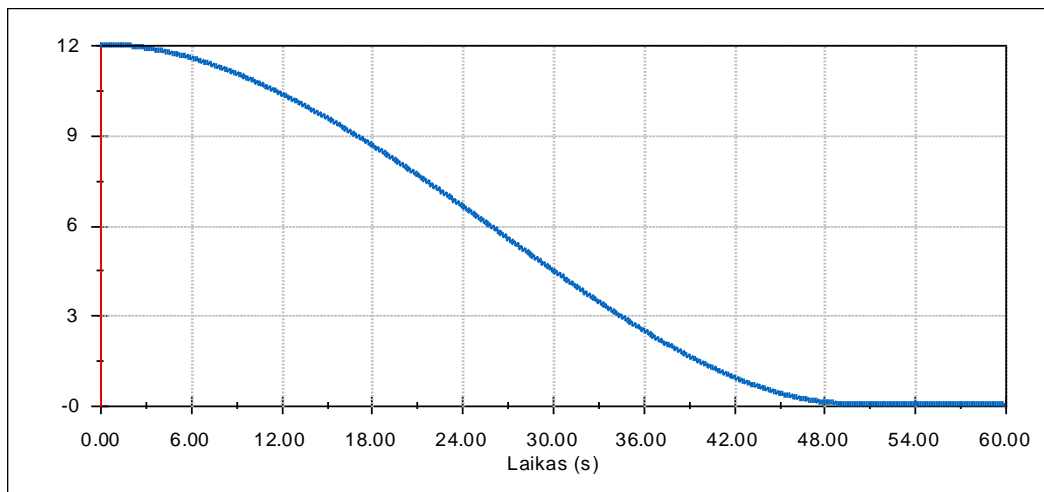


- Stiklo paketo aukštis 3000 mm:

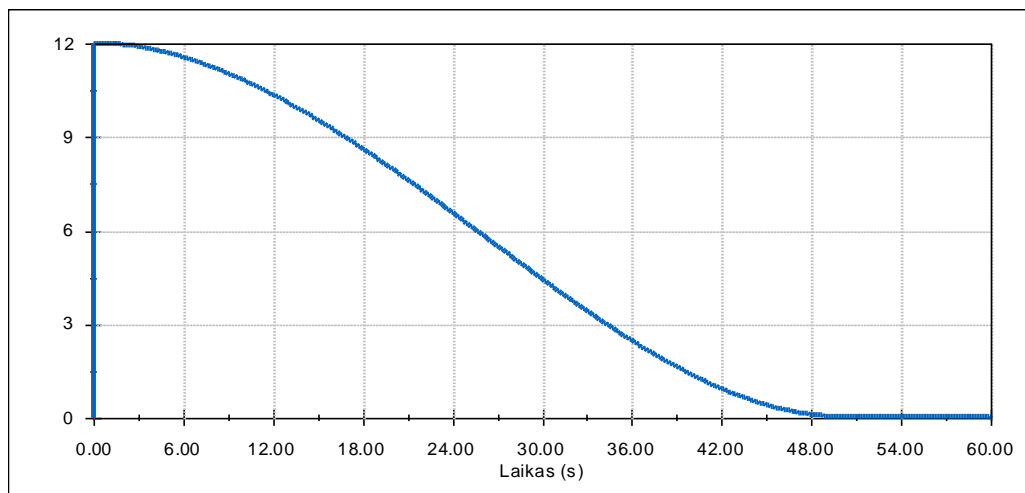


### Griebtuvo poslinkio priklausomybių nuo laiko grafikai

- Stiklo paketo aukštis 2500 mm:



- Stiklo paketo aukštis 2700 mm:



- Stiklo paketo aukštis 3000 mm:

