



**VILNIAUS UNIVERSITETAS
ŠIAULIŲ AKADEMIJA**

IŠMANIOSIOS GAMYBOS INŽINERIJOS MAGISTRO STUDIJŲ PROGRAMA

ERNESTAS RIMŠA

Magistro studijų baigiamasis darbas

LINIJINĖS ROBOTO JUDĖJIMO SISTEMOS EFEKTYVUMO TYRIMAS

Darbo vadovas: prof. dr. Sergėjus Rimovskis

Šiauliai, 2022

**Studijuojančiojo, teikiančio baigiamąjį
darbą, GARANTIJA**

WARRANTY of Final Thesis

Vardas, pavardė <i>Name, Surname</i>	Ernestas Rimša
Padalinys <i>Faculty</i>	Šiaulių akademija <i>Šiauliai Academy</i>
Studijų programa <i>Study Programme</i>	Išmaniosios gamybos inžinerija <i>Smart Manufacturing Engineering</i>
Darbo pavadinimas <i>Thesis topic</i>	Linijinės roboto judėjimo sistemos efektyvumo tyrimas <i>Efficiency analysis of Linear Robot Transfer System</i>
Darbo tipas <i>Thesis type</i>	Baigiamasis darbas <i>Final Thesis</i>

Garantuojau, kad mano baigiamasis darbas yra parengtas sąžiningai ir savarankiškai, kitų asmenų indėlio į parengtą darbą nėra. Jokių neteisėtų mokėjimų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

I guarantee that my thesis is prepared in good faith and independently, there is no contribution to this work from other individuals. I have not made any illegal payments related to this work.

Šiame darbe tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos yra pažymėtos literatūros nuorodose.

Quotes from other sources directly or indirectly used in this thesis, are indicated in literature references.

Aš, Ernestas Rimša, pateikdamas (-a) šį darbą, patvirtinu (pažymėti)



**Embargo laikotarpis
Embargo Period**

Prašau nustatyti šiam baigiamajam darbui toliau nurodytos trukmės embargo laikotarpį:
I am requesting an embargo of this thesis for the period indicated below:

_____ mėnesių / *months*
(embargo laikotarpis negali viršyti 60 mėn. / *an embargo period shall not exceed 60 months*).

Embargo laikotarpis nereikalingas / *no embargo requested*.

Embargo laikotarpio nustatymo priežastis / *Reason for embargo period:*

TURINYS

LENTELIŲ SAŖAŠAS	4
PAVEIKSLŲ SAŖAŠAS	5
SANTRAUKA.....	6
ĮVADAS.....	8
1 MOKSLINĖS LITERATŪROS ANALIZĖ.....	10
1.1 Pramonė.....	10
1.2 Pramonė 5.0.....	12
1.3 Pramoninių robotų istorija.....	13
1.4 Linijinės robotų judėjimo sistemos	15
2 LINIJINĖS ROBOTŲ JUDĖJIMO SISTEMOS DIEGIMAS	20
2.1 Išlaidų įvertinimas	20
2.2 Stacionarios robotų darbo vietos	24
2.3 Robotas su linijine judėjimo sistema.....	25
2.4 Atsiperkamumo patikrinimas	27
2.5 Patikrinimas <i>Visual Components</i> aplinkoje.....	30
IŠVADOS	34
LITERATŪRA.....	35

LENTELIŲ SAŖAŠAS

2.1 lentelė.....	24
2.2 lentelė.....	24
2.3 Lentelė.....	25
2.4 lentelė.....	26
2.5 Lentelė.....	26
2.6 lentelė.....	29

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. pirmosios pramonės revoliucijos plitimas Europoje [2]	11
2 pav. nelaimingų atsitikimų pramonėje pokytis [6]	13
3 pav. Macron Dynamics linijinė judėjimo sistema	17
4 pav. Easom Automation linijinė judėjimo sistema	18
5 pav. Kawasaki RTU-45	18
6 pav. kainų augimas Lietuvoje 2021 m. [11]	20
7 pav. Pasaulyje kasmet parduodamų robotų skaičius (tūkstančiais) [12]	21
8 pav. Kasmetinis pramoninių robotų įrengimo pasiskirstymas [12]	22
9 pav. Pramoninių robotų kainų pokytis (kainos JAV doleriais) [14]	22
10 pav. ABB IRB 4600 pramoninis robotas [15]	23
11 pav. Pramoninio roboto ABB IRB 4600 matmenys [15]	23
12 pav. ABB IRBT 4004. [17]	26
13 pav. Išlaidų suvedimas į skaičiuoklę	27
14 pav. Skaičiuoklės rezultatai	28
15 pav. Skaičiuoklės rezultatai antros modernizacijos duomenimis	28
16 pav. Išlaidų diagrama	30
17 pav. Visual Components programa sukurta dviejų robotų darbo vizualizacija	31
18 pav. Dviejų robotų darbo vietos užimamas plotas	31
19 pav. Roboto su linijine judėjimo sistema vizualizacija	32
20 pav. robotizuotos darbo vietos su linijine judėjimo sistema brėžinys	33
21 pav. Visual Components programa sukurta vizualizacija su linijine judėjimo sistema	33

SANTRAUKA

Rimša E. Linijinės roboto judėjimo sistemos efektyvumo tyrimas: Išmaniosios gamybos inžinerijos magistro darbas / mokslinis vadovas doc. dr. S. Rimovskis; Vilniaus universitetas, Šiaulių akademija, 2022, 36 p.

Vis sparčiau įmonėms renkantis automatizuotą gamybą labai svarbu tinkamai suprojektuoti gamybos linijas, pasirinkti robotus bei jų periferinę įrangą kuo geriau tinkamą atliekamam procesui. Norint tai atlikti reikia nuolat domėtis automatikos technologijų naujovėmis. Augant automatizuotų įmonių skaičiui didėja ir įmonių gaminančių šias sistemas prekių asortimentas. Priklausomai nuo atliekamo proceso galima pasirinkti tarp itin kompaktiško arba ypač didelių gabaritų robotų. Dėl vis dar ganėtinais brangių robotų vis daugiau įmonių renkasi linijines robotų judėjimo sistemas, kurios leidžia vienam robotui aptarnauti keletą mašinų vienu metu. Šiame magistro baigiamajame darbe analizuojami automatizuotos gamybos linijos su linijine judėjimo sistema privalumai lyginant su stacionariuose darbo vietose dirbančiais robotais.

Darbe pateikti išlaidų skaičiavimai įrodantys, kad gamybos linija su linijine judėjimo sistema yra žymiai pigesnė bei jos aptarnavimas reikalauja mažiau išlaidų. Pasitelkiant *Visual Components* programą sukurtos dvi gamybos linijų vizualizacijos.

Prasminiai žodžiai: Gamyba, Linijinė roboto judėjimo sistema, robotizavimas, išlaidų skaičiavimas, lyginamoji analizė.

SUMMARY

Rimša E. Efficiency analysis of Linear Robot Transfer System: Master's work in Smart Manufacturing Engineering / supervisor doc. dr. S. Rimovskis; Vilnius University, Šiauliai Academy, 2022, 36 p.

As companies choose automation more and more rapidly, it is very important to design production lines, choose robots and their peripherals for the best possible process. To do this, you need to be constantly interested in innovations in automation technology. With the growing number of automated companies and the range of companies producing these systems. Depending on the processor being performed, you can choose between ultra-compact or extremely bulky robots. Because of the still relatively expensive robots, more and more companies are opting for linear robot movement systems that allow a robot to service one machine at a time. This master's thesis analyzes the advantages of an automated production line with a linear motion system compared to robots working in stationary workplaces.

The cost calculations presented in the work prove that the production line with the linear movement system is significantly cheaper and its maintenance requires less cost. Two visualizations of production lines have been created using Visual Components.

Keywords: Manufacturing, Linear Robot Transfer System, Robotization, costing, benchmarking.

IVADAS

Daugelyje pramonės šakų šiandien reikalingi automatizuoti procesai, siekiant užtikrinti procesų pakartojamumą, sumažinti kintamumą, patenkinti kokybės lūkesčius ir sumažinti gamybos sąnaudas. Automatizavimas yra gyvybiškai svarbus daugeliui įmonių, kad atitiktų gaminių kokybę, tenkintų vartotojų poreikius ir išliktų konkurencinga. Robotinės sistemos siūlo geriausią investiciją, nes jas galima perprogramuoti arba panaudoti, kad atitiktų produktų įvairovę ir gyvavimo ciklus.

Gamybos linija ar atskiros jos dalys automatizuojamos tam, kad palengvintų žmonių darbą, kai darbuotojai nebespėja su gamybos procesu. Suprojektuoti originalų automatinį įrenginį, skirtą būtent tam veiksmui ar operacijai atlikti, paprastai netikslinga ir geriau naudoti pramoninį robotą, kuris, reikalui esant, gali būti perprogramuotas kitam veiksmui ar veiksmų sekai atlikti. Robotai gali pakeisti ypač monotonišką darbą atliekančius darbininkus arba pavojingose vietose dirbančius žmones [3].

Šiandien tikriausiai sunkiai įsivaizduojame pramonę be pramoninio roboto. Dauguma įmonių renkasi robotus tam, kad pakeistų monotonišką darbą atliekančius darbuotojus. Tačiau ne mažiau svarbu ir tinkamai išnaudoti gamybinėse patalpose esantį plotą, padidinti gamybos produktyvumą. Siekiant kuo efektyviau tai padaryti vis daugiau įmonių vietoje keleto robotų renkasi vieną ir išplečia jo darbo zoną įrengdami linijinę robotų judėjimo sistemą.

Šiame magistro baigiamajame darbe aprašytas procesas tiriantis linijinės roboto judėjimo sistemos efektyvumą aptarnaujant keletą mašinų vienu metu. Bei lyginami išlaidų ir atsiperkamumo rodikliai atliekant tą patį procesą naudojant keletą robotų ir vieną robotą su linijine judėjimo sistema.

Tyrimo aktualumas.

Vienas iš pagrindinių reikalavimų pramonėje norint gauti kuo didesnę pelną yra robotų pozicionavimo tikslumas, pakartotinumai ir greitis. Linijinės robotų judėjimo sistemos puikiai apjungia šiuos tris reikalavimus.

Tyrimo objektas.

Linijinė roboto judėjimo sistema.

Tyrimo tikslas.

Ištirti roboto linijinės judėjimo sistemos efektyvumą bei įvertinti jos pranašumą lyginant su 6 ašių pramoniniais robotais sumontuotais ant stacionaraus stovo.

Tyrimo uždaviniai.

1. Palyginti linijinės roboto judėjimo sistemos privalumus ir trūkumus prieš stacionarius robotus;
2. Naudojant *Visual Components* programą sudaryti procesų simuliacijas;

3. Palyginti ekonominį naudingumą robotizavus technologinį procesą;
4. Pateikti išlaidų reikalingų sistemų įrengimui skaičiavimus ir nustatyti atsiperkamumo laikotarpius.

Tyrimo metodai.

Mokslinės literatūros lyginamoji analizė, proceso simuliacija *Visual Components* programa.

Teorinė darbo reikšmė.

Rengiant magistrinį darbą sukurta proceso simuliacija naudojant *Visual Components* programą, apžvelgiama linijinė roboto judėjimo sistema.

Praktinė darbo reikšmė.

Darbe pateikti linijinės roboto judėjimo sistemos privalumai ir trūkumai leidžia lengviau nuspręsti kuri sistema labiau tinkama atliekant ruošinių perkėlimą nuo vienu apdirbimo staklių prie kitų.

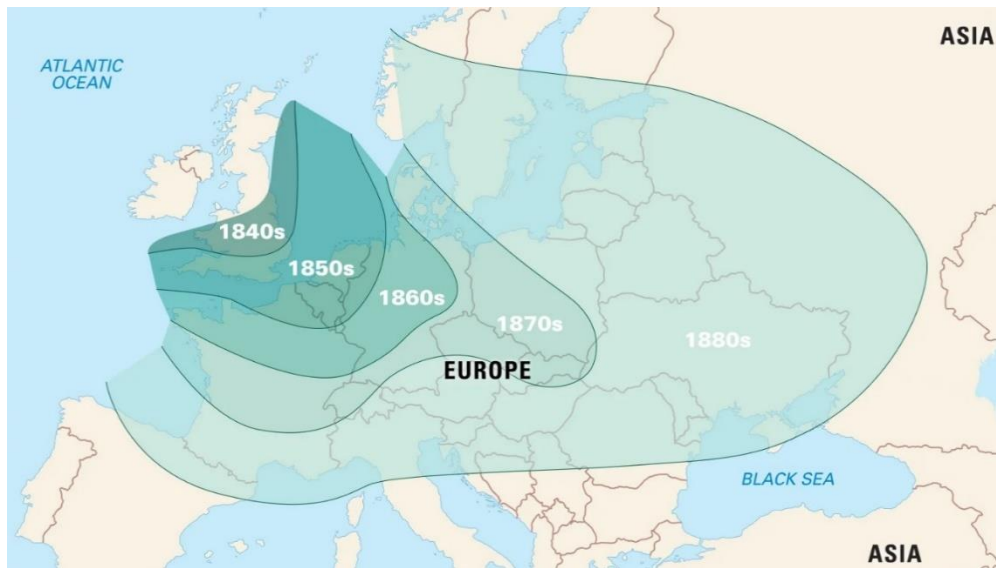
1 MOKSLINĖS LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1 Pramonė

Pramonė arba dar kitaip industrija yra ūkio šaka, kurios įmonės naudojamos įvairias technologijas gamina vartojimo ir investicines prekes iš žaliavų, medžiagų, pusfabrikačių ar išgauna jas iš gamtos. Pramonė kartu su žemės ūkiu ir paslaugų sfera sudaro tris pagrindines struktūrines dalis, į kurias skirstomas pasaulio, šalies ar ekonominio regiono ūkis. Pramonę siaurąja prasme sudaro pramonė įmonės (gamyklos, fabrikai, dirbtuvės, kasyklos, šachtos ir kitos), kurios išgauna įvairius gamtinius išteklius iš žemės gelmių, miškų, vandenių (gavybos pramonė) ir perdirba žemės ūkio ar kitų pramonės šakų pagamintas žaliavas, medžiagas ir gamina prekes, tinkamas galutiniam vartojimui, ilgalaikio naudojimo mašinas, įrangą, mechanizmus (apdirbamoji pramonė). Pramonė plačiąja prasme t. p. apima statybą, energetiką, elektros, dujų ir vandens tiekimą. Pramonė skirstoma į daug savarankiškų pramonės šakų, iš jų svarbiausios – maisto pramonė (be duonos pramonės, mėsos pramonės, pieno pramonės ir kitų, jai t. p. tradiciškai priskiriama alaus pramonė, spirito pramonė, kitų alkoholinių ir nealkoholinių gėrimų gamyba, tabako pramonė), kasybos pramonė, miško pramonė, kuro pramonė, statybinių medžiagų pramonė, lengvoji pramonė, chemijos pramonė, medicinos pramonė, metalurgija, metalo apdirbimo pramonė, mašinų ir prietaisų pramonė, elektronikos pramonė, poligrafijos pramonė, leidyba, telekomunikacijų pramonė. Pramonės plėtrą ir šakinę struktūrą lemia mokslinė techninė pažanga ir jos laimėjimų įdiegimo gamyboje laipsnis, darbo pasidalijimas ir specializacija visuomenėje, darbo jėgos kaina ir kvalifikacija, kapitalo investicijos į gamybą (technologiskai sudėtingiems gamybos procesams organizuoti, įrangai, mašinoms, gamybiniam pastatams įsigyti ir modernizuoti reikia didelių kapitalinių įdėjimų, dėl to pramonės struktūroje vyrauja didelės įmonės), šalies gamtiniai išteklių, gamybos aprūpinimas žaliavomis ir energetiniais išteklių, gyventojų materialiniai poreikiai, tarptautinė gamybos specializacija ir kooperacija. Pramonės gamybos masto didinimas, produkcijos kokybės gerinimas spartina šalies techninę, ekonominę ir socialinę plėtrą, skatina urbanizaciją, gerina žemės ūkio ir paslaugų sferos techninę bazę, namų ūkių aprūpinimą naujesnėmis ir geresnėmis vartojimo prekėmis, kurios palengvina gyventojų buitį. Pramonės plėtra neišvengiamai sukelia ir naujų ekologinių (aplinkos teršimas, gamtinių išteklių sekinimas), socialinių problemų. [15]

Pirmoji pramonės revoliucija žymi XVIII amžiaus antrosios pusės vystymosi laikotarpį, kuris daugiausia kaimo, agrarines visuomenes Europoje ir Amerikoje pavertė industrializuotomis miesto visuomenėmis. Kadangi tekstilės, geležies gamybos ir kitose pramonės šakose buvo įdiegtos naujos

mašinos ir technologijos, prekės, kurios kažkada buvo kruopščiai pagamintos rankomis, pradėtos gaminti dideliais kiekiais gamyklose. Kaip matyti iš 1 paveikslą pramonės revoliucija, paskatinta permainingo garo energijos naudojimo, prasidėjo Didžiojoje Britanijoje ir išplito į Europą, Aziją. Anglai, Viljamas ir Johnas Cockerilas atnešė pramonės revoliuciją Belgija išplėtodama mašinų dirbtuves, o Belgija tapo pirmąja šalimi žemyninėje Europoje, kuri buvo ekonomiškai transformuota. Kaip ir britų protėvis, Belgijos pramonės revoliucija susitelkė į geležį, anglį ir tekstilę. [11] [20]



1 pav. pirmosios pramonės revoliucijos plitimas Europoje [2]

Nepaisant didelio sutapimo su pirmąja, XIX amžiaus pabaigoje ir XX amžiuje atsirado vis daugiau „naujos“ pramonės revoliucijos įrodymų. Kalbant apie pagrindines medžiagas, šiuolaikinė pramonė pradėjo eksploatuoti daugybę iki šiol nenaudotų natūralių ir sintetinių išteklių: lengvesnius metalus, retuosius metalus, naujus lydinius ir sintetinius gaminius, tokius kaip plastikai, taip pat naujus energijos šaltinius. Kartu su jais buvo tobulinami mašinos, įrankiai ir kompiuteriai, dėl kurių atsirado automatinė gamykla. Nors kai kurie pramonės segmentai XIX amžiaus pradžioje ir viduryje buvo beveik visiškai mechanizuoti, automatinis veikimas, skirtingai nuo surinkimo linijos, pirmą kartą įgijo didelę reikšmę XX amžiaus antroje pusėje. [11]

Trečiajai pramonės revoliucijai būdingas automatizavimo ir skaitmeninimo plitimas naudojant elektroniką ir kompiuterius, interneto išradimas ir branduolinės energijos atradimas. Šioje epochoje kaip niekada anksčiau kilo elektronika – nuo kompiuterių iki naujų technologijų, leidžiančių automatizuoti pramoninius procesus. Telekomunikacijų pažanga paskatino plačiai paplitusią globalizaciją, kuri savo ruožtu leido pramonės šakoms perkelti gamybą į žemų sąnaudų ekonomiką ir radikalizuoti verslo modelius visame pasaulyje. [20]

Ketvirtoji pramonės revoliucijos era pasižymi skaitmeninimu, skaitmeninėmis transformacijomis, asmeniniais prijungtais įrenginiais, duomenų analize, AI technologijomis, automatizavimu ir pramoniniu daiktų internetu. IT standartai diegiami pramonės automatizavimui, įrenginiai tampa mažesni ir išmanesni, IT ir OT operacijos bendradarbiauja, kad priimtų verslo lygmens sprendimus ir toliau keistų verslo modelius. Tai amžius, kai susiduriama su ribomis tarp fizinės, skaitmeninės ir biologinės sferos, o pramonės šakos visame pasaulyje išraunamos. Gamyklos naudoja tokias technologijas kaip debesis, Big Data Analytics ir IoT, kad įgalintų pažangų ir efektyvų ryšį tarp skirtingų žaidėjų ir prijungtų objektų gamybos linijoje. Tai gali tapti pramonės revoliucija, kuri nukrypsta nuo neatsinaujinančių energijos šaltinių ir yra integruota į išmaniuosius miestus, maitinamus vėjo, saulės ir geoterminės energijos. Iki šiol ketvirtosios pramonės revoliucijos etapai apima: didelio masto skaitmeninimą, daiktų interneto tinklą ir IIoT atsiradimą, mašininį mokymąsi, dirbtinį intelektą, nuspėjamąją analizę ir priežiūrą pramoninėse aplinkose, didelių duomenų ir debesų kompiuterijos technologijas ir pažangią robotiką. [20]

1.2 Pramonė 5.0

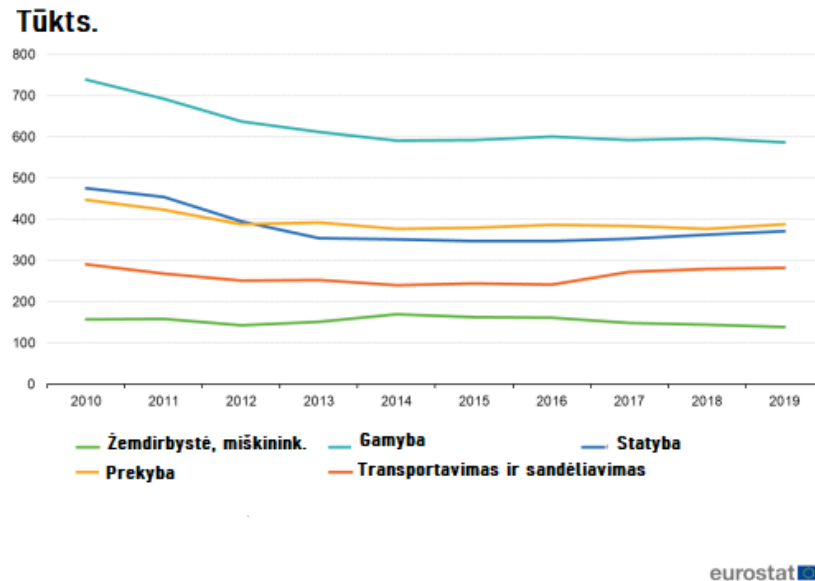
Nespėjusiems pereiti prie pramonės 4.0 principų taikymo ir įgyvendinimo teks dar labiau pasitempti. Politikai jau kalba apie pramonės 5.0 principų diegimą. Verslų laukia naujas iššūkis – sinergijos tarp žmogaus ir technologijų kūrimas ir palaikymas bei socialinių ir aplinkosauginių klausimų sprendimas.

Nepraėjo nė dešimt metų, kai buvo pradėta kalbėti apie ketvirtąją pramonės revoliuciją, kitaip dar vadinamą Pramonė 4.0, o jau imama kalbėti apie kitą revoliuciją – Pramonė 5.0. Ketvirtoji pramonės transformacija yra siejama su tokių technologijų kaip didieji duomenys, dirbtinis intelektas, daiktų internetas, robotika, 3D spausdinimas ir pan. diegimu ir plėtra, o penktojoje pramonės revoliucijoje dėmesys skiriamas žmogaus rankų ir proto sugražinimui į pramonę. Čia svarbiausia tampa žmogaus ir technologijų sinergija, derinant žmogaus protą ir kūrybiškumą su technologijų efektyvumu. [5]

Pramonėje 4.0 buvo akcentuojamas efektyvumas, našumas, pelningumas – įmonių savininkams artimesnės sąvokos, o Pramonės 5.0 epicentre šalia šių sąvokų atsiduria darbuotojo bei visuomenės interesai ir jų gerovė. Didžiausia prognozuojama Pramonės 5.0 pažanga yra siejama su žmogaus intelekto ir technologijų sąveika. Tai leis užtikrinti ir naudą aplinkai, nes bus skiriamas dar didesnis dėmesys atsinaujinančiai energetikai ir taršos mažinimui. [5]

Remiantis Eurostat duomenimis, daugiausiai nelaimingų nutikimų darbo vietoje užfiksuota statybos, transporto ir sandėliavimo bei gamybos sektoriuose. Būtent pažangios technologijos šiuose

sektoriuose galėtų perimti pavojingus ir sunkius darbus, taip užtikrinant saugesnę darbo aplinką ir sumažinant nelaimingų nutikimų. Pagal pateiktą diagramą (žr. 2 pav.) matome, kad vystantis pramonei nelaimingų atsitikimų darbe nors ir ne taip sparčiai kaip norėtume, tačiau mažėja.



2 pav. nelaimingų atsitikimų pramonėje pokytis [6]

COVID-19 pandemija parodė, kaip greitai pramonė turi gebėti prisitaikyti prie naujų aplinkos sąlygų. Iki šiol labiausiai akcentuotas augantis efektyvumas yra tikrai labai naudingas, tačiau labai dažnai jis yra susijęs su nelankstumu. Didelės gamyklos labai efektyviai veikia esant stabiliai aplinkai, tačiau jos gali būti labai nelanksčios, kai dėl nenumatytų aplinkybių tenka nutraukti gamybą ar sumažinti jos mastus.

1.3 Pramoninių robotų istorija

Pramoniniai robotai dažnai aptariami XXI amžiaus inovacijų kontekste. Tačiau jų šaknys siekia daug senesnę šeštąjį dešimtmetį, kai George'as Devolas sukūrė pirmąjį pramoninį robotą – dviejų tonų sveriantį įrenginį, kuris su hidraulinėmis pavaromis autonomiškai perkeldavo objektus iš vienos vietos į kitą. Nuo to laiko, tobulėjant jutikliams, elektronikai ir kompiuterių programinei įrangai, pramoninių robotų galimybės labai išsiplėtė ir apėmė sudėtingas užduotis, tokias kaip suvirinimas, dažymas, surinkimas, pakavimas, dėjimas į padėklus, tikrinimas ir testavimas – visa tai atliekama greitai ir tiksliai. ir pakartojamumą. [1]

Komerciniais tikslais robotai surinkimo linijose buvo pradėti naudoti septintojo dešimtmečio pradžioje. Dauguma jų turėjo hidraulines arba pneumatines svirtis ir pirmiausia buvo naudojamos sunkiasvoriams kelti. Nors įrenginiai buvo primityvūs, be jutiklių ir riboto programavimo, jie pasirodė

esąs neįkainojamas įrankis didinant gamybą gamybos įrenginiuose ir sudarė sąlygas ilgam robotikos kūrimo laikotarpiui.

Pirmieji robotai buvo naudojami paprastoms užduotims atlikti, pavyzdžiui, paimti ir padėti. Jie pakeitė žmones monotoniškose, pasikartojančiuose, sunkiuose ir pavojinguose užduotyse. Vėliau kai robotai pradėjo galėti atlikti sudėtingesnes užduotis bei kai buvo sukurtas išorinis sensorius, robotai ėmė galėti atlikti tokias užduotis kaip, suvirinimas, šlifavimas, šlifavimo pašalinimas ir surinkimas.

Šiais laikais pramoninius robotus grubiai tariant, galima suskirstyti į tris skirtingas grupes:

- medžiagų tvarkymas (Paletizavimas);
- procesų operacijos (Amdirbimas, suvirinimas);
- surinkimas.

Apskritai pramoniniai robotai naudojami siekiant sumažinti išlaidas, padidinti pelną, pagerinti produktų kokybę ir pašalinti kenksmingas darbo sąlygas žmogaus organizmui. Šie pagrindiniai veiksniai, lemiantys robotikos technologijų vis platesnį ir platesnį panaudojimą gamybos pramonėje. [21]

Pramoninių robotų tyrimas ir valdymas nėra naujas mokslas, tai greičiau mišinys iš mechanikos, elektronikos inžinerijos ir informatikos mokslų. Matematikos pagalba galima apibūdinti erdvinius judesius, sukurti ir įvertinti algoritmus norimam judesiui pasiekti pagal valdymo teoriją. Elektros inžinerija yra naudinga kuriant jutiklius ir sąsajas pramoniniams robotams. Paskutinis, bet ne mažiau svarbus dalykas – informatikos mokslas suteikia galimybę programuoti įrenginį norimai užduočiai atlikti.

Nuo tada, kai XVIII amžiuje prasidėjo pramonės revoliucija, automatizavimas buvo pagrindinė jėga bandant racionalizuoti gamybos procesą. Dar prieš pusę amžiaus automatizavimas buvo beveik mechanizacijos sinonimas. Rankinį darbą pakeitė mašinų ir kitų techninių priemonių kūrimas. Tačiau viso to trūkumas buvo didelės sąnaudos ir kad vienas viena mašina galėjo atlikti tik vieną darbą. Prieš gaminant naują gaminį teko perstatyti visą gamybos liniją. Dėl to automatizuota gamyba daugiausia buvo taikomas masinės gamybos pramonės šakose, pavyzdžiui, automobilių pramonėje. [21]

Dauguma šiandien naudojamų pramoninių robotų yra aprūpinti daugybe pažangių jutiklių, kurie renka didžiulį duomenų kiekį. Integruoti su pažangia analitika ir ML programine įranga, robotai gali interpretuoti šiuos duomenis ir naudoti juos prisitaikydami, keisdami mechaninius judesius ir geriau atlikdami užduotį. Šis siekis suteikti robotams „tikrąjį intelektą“ dabar yra pagrindinis robotikos inžinierių dėmesys. [20]

Robotai ir robotizuotos sistemos – gamybos technologijos plėtros ir organizavimo pasiekimas. Robotai sumažina laiko ir finansines sąnaudas tai pačiai gamybinei funkcijai besikeičiančios gamybos

aplinkos sąlygomis atlikti. Tam kad būtų lengviau juos įvaldyti, technologiniai procesai turi būti sudaromi remiantis sisteminiu požiūriu. Tam reikalinga bendra matematinė, programinė, informacinė, techninė – metodinė ir organizacinė įranga. Robotų technika yra įvairių mokslo krypčių informacinė sritis. Čia susiduriama su mechaninių ir elektrinių mazgų projektavimo, robotų jutimo ir valdymo sistemų kūrimo, kompiuterinės technikos panaudojimo ir dirbtinio intelekto problemomis. [3]

1.4 Linijinės robotų judėjimo sistemos

Didėjant automatizavimui, linijinės robotikos atvejis išsiplėtė. Linijiniai robotai yra pramoninių robotų tipas, turintis dvi arba tris pagrindines ašis, kurios juda tiesia linija, o ne sukasi ir veikia stačiu kampu vienas kito atžvilgiu. Trys slankiojančios jungtys atitinka riešo judėjimą; aukštyn ir žemyn, pirmyn ir atgal, taip pat į vidų ir į išorę. Linijiniai robotai, kurių abiejuose galuose palaikomos horizontalios dalys, vadinami portaliniais robotais.

Kalbant apie pritaikymą, didžiausias pelnas pasiekiamas suvirinimo, surinkimo ir gaminių tvarkymo srityse. Daugelis šių užduočių atliekamos sudėtingais šešių ašių robotais, kurie gali atlikti labai tikslias operacijas. Tačiau automatikos pasaulis kartais reikalauja, kad šie robotai būtų mobilūs. Tai ypač aktualu tais atvejais, kai gamybos vietos turi ribotus išteklius. Kalbant apie šių robotų perkėlimą į vietą, logiškiausias variantas yra pridėti septintąją ašį – linijinę sistemą, kuri perkelia robotą į skirtingas stotis, kad išplėstų jo veikimo sritį.

Pridėjus linijinę septintąją ašį, darbo apimtis gali būti išplėsta iki taško, kad būtų galima naudoti mažesnę robotą tam pačiam darbui atlikti. Be to, dalys gali būti perkeltos į kelias darbo vietas didesniu atstumu nei tai įmanoma naudojant stacionarų robotą. Kalbant apie efektyvumą, pridėjus septintąją ašį, vienu robotu galima aptarnauti daugiau mašinų ir procesų, o tai turi papildomą pranašumą – sumažinamos kapitalo sąnaudos.

Linijinė robotika naudojama įvairiais būdais, tačiau dažniausiai naudojami šie:

- Paėmimo ir padėjimo – didelio greičio paėmimo ir išdėstymo robotai perkelia gaminį iš vienos vietos į kitą itin tiksliai. Rankomis padarytos klaidos, pvz., netinkamo elemento įdėjimas į netinkamą vietą, gali būti pakeistos linijine robotika. Įdiegus paėmimo ir padėjimo sistemą, skirtą daiktams sudėti tam tikrose vietose ir surinkimo linijose, galima žymiai pagerinti efektyvumą ir tikslumą, taip pat išvengti traumų.

- Rūšiavimas – linijinis robotas gali supaprastinti tradiciškai rankinį ir monotonišką rūšiavimo procesą, todėl jis tampa efektyvesnis ir saugesnis.

- Pakavimo – naudojant linijinę robotikos sistemą, pakavimo procesai gali vykti 24 valandas per parą, 7 dienas per savaitę, nes teoriškai galite veikti net užgesus šviesoms! Darbininkams būtų labai sunku leisti gamybą vykdyti be sustojimo. Tai pašalina 3 pamainos įgulos poreikį. Tai puikus būdas pagerinti apyvartos laiką.

- Paletizavimo – Padėklų kroviklis paima produktus ir deda juos pagal iš anksto nustatytą modelį, kad sudarytų sluoksnius, o tada deda ant padėklo. Robotinės sistemos labai padidina padėklų krovimo procesų našumą ir patikimumą.

- Surinkimo – daugelį procesų, tokių kaip dozavimas, pjovimas, formavimas, suvirinimas ir t.t., geriau atlieka linijinė robotų sistema, ypač kai reikia ilgų kelionių ir didesnio pasiekiamumo.[10]

Skirtingai nuo įprastų konfigūracijų, kai robotas prisukamas prie grindų, linijinės robotų judėjimo sistemos perkelia robotus per darbo vietas ir gamyklas ir perveža juos tarp stočių. Nepriklausomai nuo roboto ar judėjimo sistemos konstrukcijos, papildomos ašies tikslas yra pridėti papildomą judesį. Tai padidina roboto aprėpties plotą ir leidžia robotui transportuoti ruošinius ar įrankius didesniais atstumais. Kai kuriais atvejais linijinės judėjimo sistemos leidžia robotui prižiūrėti kelias mašinas arba pasiimti padėklus iš eilių arba apdirbti labai didelius komponentus. Pastariesiems dažniausiai naudojami pakavimo, suvirinimo, pjovimo plazminiu lanku ir kitos mechaninės užduotys.

Kai kuriuose linijinėse judėjimo sistemose yra įtaisas, skirtas robotams apversti, kad būtų lengviau patekti į mašinas iš viršaus, dažniausiai naudojamos linijinės judėjimo sistemos, kurios pritvirtinamos prie grindų ir nukreipia robotą vertikaliai. Šios linijinės judėjimo sistemos turi didesnę apkrovą, kadangi turi atlaikyti robotą ir nešamus krovinius, sveriančius didelį svorį. Paprasčiausias yra linijinės vėžės poros, turinčios platformas, prie kurių robotas prisukamas. Tačiau daugelis originalios įrangos gamintojų kuria linijines judėjimo sistemas robotams kurie atliks didelio tikslumo darbus, pavyzdžiui, pjovimo užduotį arba liejinių perkėlimą įvairioms staklėms apdorojimui.

Didžiausias iššūkis kuriant robotų linijines judėjimo sistemas yra užprogramuoti juos sinchronizuoti su jų nešamais robotais. Antrasis didžiausias iššūkis yra priversti linijines judėjimo sistemas palaikyti tikslų tiesinį judėjimą daugelio metrų atstumu. Greitis yra vienas svarbiausių linijinės judėjimo sistemos projektavimo tikslas. Tai ypač aktualu, kai linijine judėjimo sistema robotas juda daugiau nei dešimt ar net daugiau metrų atstumu. Kai kurie robotai linijine judėjimo sistema gali judėti didesniu nei 3 metrų per sekundę greičiu.

Vidutinio dydžio linijinėse judėjimo sistemose važiuojančiose robotus dažnai naudojami varikliai, suporuoti su diržine pavara. Tai gana paprastos sistemos, kuriose naudojami elektros varikliai

varomi skriemuliai, kad sukurtų įtempimą išilgai diržo ir greitai įsibėgėtų. Tačiau tokia sistema netinka linijinei judėjimo sistemai naudojamai ilgesniam atstumui, kadangi gali kilti problemų dėl diržų atsipalaidavimo, sistema negali išlaikyti įtempto diržo labai ilgą atstumą.

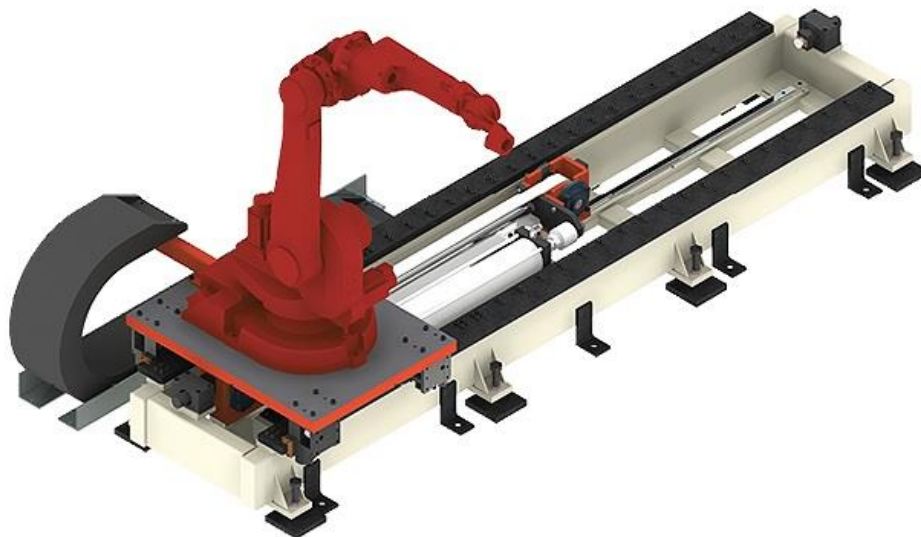
Labiausiai patikimose diržu varomos linijinės judėjimo sistemos naudoja rėmelius ir linijinius takelius papildomai orientuojant, kad diržu varoma sąranka būtų tikslesnė. Kai kurios linijinės judėjimo sistemos su diržu varomomis bėgių pavaromis gali išlaikyti tikslumą iki $\pm 0,02$ mm net kai vienos tonos robotai perkeliami per dešimtis metrų.



3 pav. Macron Dynamics linijinė judėjimo sistema

Pavaizduota roboto linijinė judėjimo sistema 3 paveiksle pagaminta „Macron Dynamics“, jos tikslumas yra apie 0,025 mm, o 1500 kilogramų sveriantis robotas perkeliamas daugiau nei 10 metrų. Vienas iš bendrovės „MacBUILT“ konstrukcijų – tai standartinių „Macron“ komponentų pritaikyta konfigūracija. Pavaros sija yra sudėtinė standartinių aliuminio profilių konstrukcija su integruotu apvaliu bėgeliu su vikšro ritinėlio kreipiančiąja. Diržinės pavaros sistema užtikrina lankstų stelažo ir krumpliaračio tipo linijinį judesį su varikliu, pritvirtintu prie vežimėlio. Ši sistema pašalina vibraciją, kuri gali pasitaikyti diržinėse pavarose. Fiksuotas mechaninis elementas užtikrina tikslų stabdymą ir padėties nustatymą.

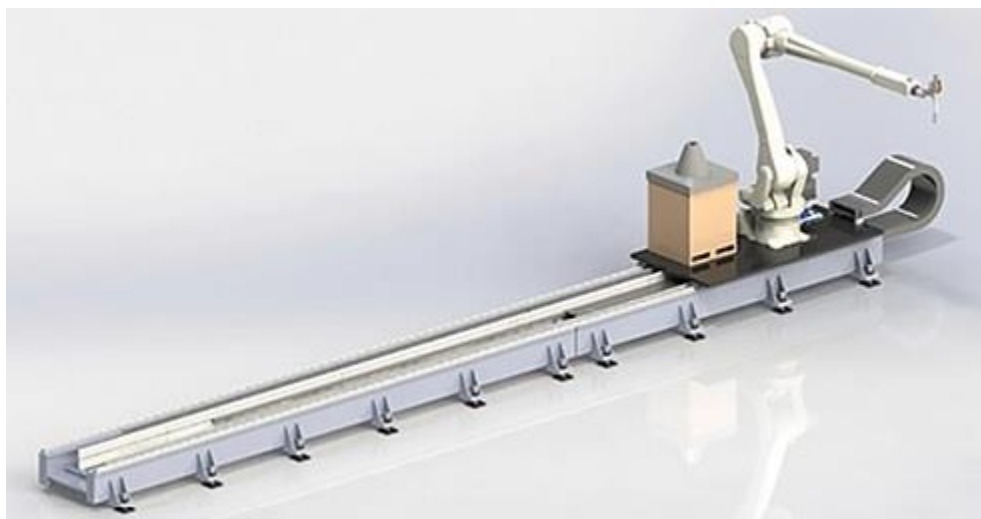
Rutuliniai sraigčiai paprastai gerai veikia iki maždaug šešių metrų ilgio, naudojant guolių atramas. Ant ilgesnių ašių pagrindinė problema yra ta, kad judant dideliu greičiu sraigčiai negaudami pakankamai atramos deformuojasi ir atsiranda didesnis pasipriešinimas, dėl ko mažėja greitis.



4 pav. Easom Automation linijinė judėjimo sistema

Linijinė judėjimo sistema pavaizduota 4 paveiksle pagaminta Jungtinių Amerikos Valstijų įmonėje „Easom Automation“ yra nebrangus sprendimas programoms, kurioms reikia judėti tik pirmyn ir atgal. Jis perkelia robotus dviejų metrų per sekundę greičiu ir puikiai sinchronizuoja su kitais roboto valdikliais.

Ilgesnės linijinės judėjimo sistemos (pavyzdžiui, naudojamos laboratorinėje robotikoje) gali naudoti ir tiesinius variklius. Daugumoje tokių linijinių judėjimo sistemų taip pat yra moderniausia elektronika, kodavimo įrenginiai ir judesio valdymas, skirtas ašims sekti, net ir po klaidų ar išjungimų. Tačiau dažniausiai linijinio variklio pasiekiamumas yra maždaug keturi metrai. Toks pasiekiamumas labiau tinka paimti ir įdėti bei puslaidininkių plokštelių tvarkymui. Linijinės judėjimo sistemos su tiesiniais varikliais užtikrina itin didelį mechaninį tikslumą, tačiau yra kur kas brangesnės.



5 pav. Kawasaki RTU-45

Kawasaki RTU-45 linijinė judėjimo sistema (žr. 5 pav.) gali nešti 2 930 kg, o tikslumas yra apie 0,2 mm, maksimalus atstumas – 30 metrų. Viena iš labiausiai paplitusių šios linijinės judėjimo sistemos programų yra ta, kai objekte atliekamos kelios operacijos, kurios vyksta lėtai. Čia ši judėjimo sistema yra ekonomiškesnė nei atskirų robotų.

Modeliuojant ir programuojant linijines robotų judėjimo sistemas inžinieriai naudoja įrankius leidžiančius suderinti linijines judėjimo sistemas su robotų funkcijomis. Roboto modeliavimo programinė įranga ir net kai kurie judesio valdiklio moduliai leidžia inžinieriams planuoti maršrutus, įkelti gautą programinę įrangą į valdiklį, o tada valdyti robotą ir linijinę judėjimo sistemą naudojant vieną valdymo pultą.

Linijinės judėjimo sistemos turi galybę privalumų lyginant su stacionariais robotais, tačiau apsunkina sistemos kalibravimą. Sukonstravus robotą ant linijinės judėjimo sistemos robotus reikia kalibruoti. Svarbiausia, kad pramoniniai robotai, tinkamai susiporuotų su linijine judėjimo sistema, vien pramoninių robotų vidutinis vienakryptis nukrypimas yra nuo 0,1 mm iki 0,01 mm, o linijinė judėjimo sistema šį nukrypimą dar padidina.

2 LINIJINĖS ROBOTŲ JUDĖJIMO SISTEMOS DIEGIMAS

Šiame skyriuje yra lyginami linijinės robotų judėjimo sistemos privalumai ir trūkumai. Apskaičiuojamas kapitalo išlaidų skirtumas naudojant linijinę robotų judėjimo sistemą su vienu roboto vietoje keleto robotų. Modeliavimui pasitelkiama *Delfoi Robotics Premium 4.2* programa.

Kiekvienos įmonės tikslas yra kuo didesnis pelnas. Geriausias būdas padidinti pelną yra atliekamo proceso optimizavimas.

Šiuo metu vis sunkiau rasti darbuotojų, dirbsiančių sunkius fizinius darbus. Vis augant kainoms (žr. 6 pav.) privalu yra kelti ir darbuotojų algas. Be to visada išlieka žmogiškasis klaidų faktorius bei gaminių kilnojimas – kenksmingas žmogaus sveikatai. Šios priežastys verčia įmones vis sparčiau modernizuoti savo gamybos procesus pakeičiant žmones robotizuota gamyba.

		palyginti su praėjusių metų gruodžio mėnesiu
Vartotojų kainų pokyčiai, apskaičiuoti pagal vartotojų kainų indeksą proc.	2021M12	10,6
	2021M11	9,2
	2021M10	8,2
	2021M09	6,4
	2021M08	5,0

6 pav. kainų augimas Lietuvoje 2021 m. [18]

Nagrinėjamas objektas yra linijinė roboto judėjimo sistema. Linijinė sistema pasižymi, kad gali aprėpti itin didelę darbo zoną. Norint tai atlikti pritaikysime šią sistemą ruošinių perkėlimo procese. Sukursime du proceso simuliacijos modelius *Delfoi Robotics Premium 4.2* programa. Linijinė judėjimo sistema dažnai dar vadinama septintąja roboto ašimi. Papildomos ašies pridėjimas prie 6 ašių roboto praplečia roboto darbo apimtį. Taip robotas gali dirbti tarp kelių darbo vietų. Taip pat pridėjus septintąją ašį prie mažesnių robotų padidiname jų pasiekiamumą ir galime naudoti daug mažesnę bei pigesnę robotą atliekant užduotis skirtas robotams su dideliu pasiekiamumu.

Pirmajame modelyje naudosime 6 ašių robotus stacionariose darbo vietose kai gaminsys nuo vienu apdirbimo staklių prie kitų keliauja konvejeriu, antroje viena robotą sumontuotą ant linijinės roboto judėjimo sistemos.

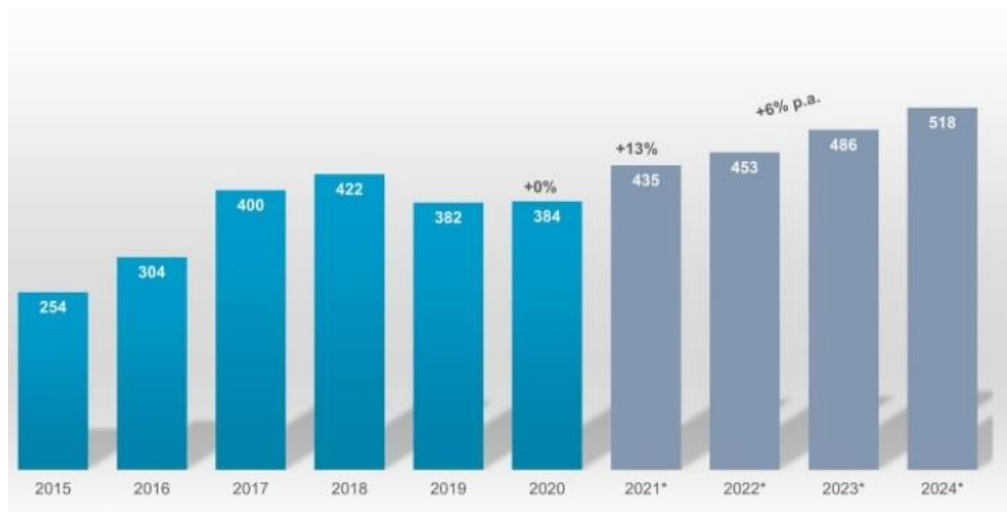
2.1 Išlaidų įvertinimas

Naujo pramoninio roboto su valdikliais kaina yra nuo 50 000 iki 80 000 Eur. Pridėjus konkrečioms programoms skirtus periferinius įrenginius, robotizuota sistema kainuoja nuo 100 000 iki 150 000 Eur. Naudoti, bet atnaujinti ir paruošti darbui robotai yra pigesnis pasirinkimas naujai

kuriamoms įmonėms ar įmonėms kurios nori modernizuoti savo vykdomą veiklą ir pakeisti žmones dirbančius monotonišką darbą. Paprastai naudoti robotai kainuoja perpus pigiau nei nauji. Naudotų robotų kainos gali svyruoti nuo 25 000 iki 40 000 Eur, o visos sistemos kaina svyruoja nuo 50 000 iki 75 000 Eur.

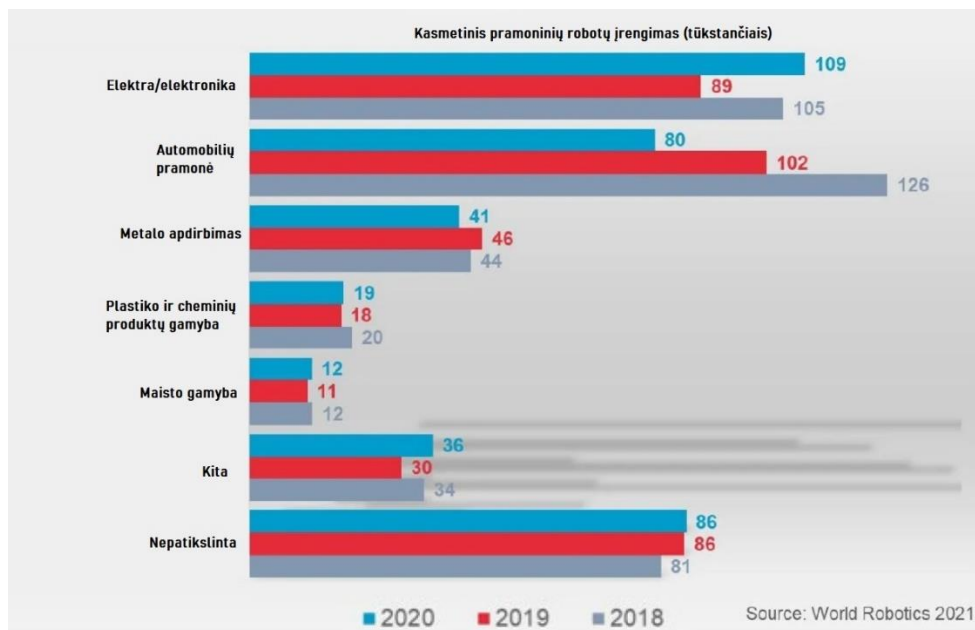
Roboto kaina yra tiesiogiai susijusi su vykdoma programa. Norėdama pasirinkti tinkamą roboto modelį, įmonė turi atsižvelgti į darbo erdvės reikalavimus, pasiekiamumo ir apkrovos ribas. Visų gamintojų robotai atliekantys tą pačią funkciją kainuoja beveik tiek pat.

Įmonėms vis dažniau modernizuojant savo veiklą pasaulyje kas metus robotų pardavimai kyla apie 6 procentus (žr. 7 pav.). Pagal tarptautinės robotikos federacijos 2021 metų spalio 28 d. pateiktus duomenis pasaulyje veikė 3 milijonai pramoninių robotų. Nepaisant COVID-19 pandemijos 2021 metais pramoninių robotų pasaulyje padaugėjo 0,5 procento.



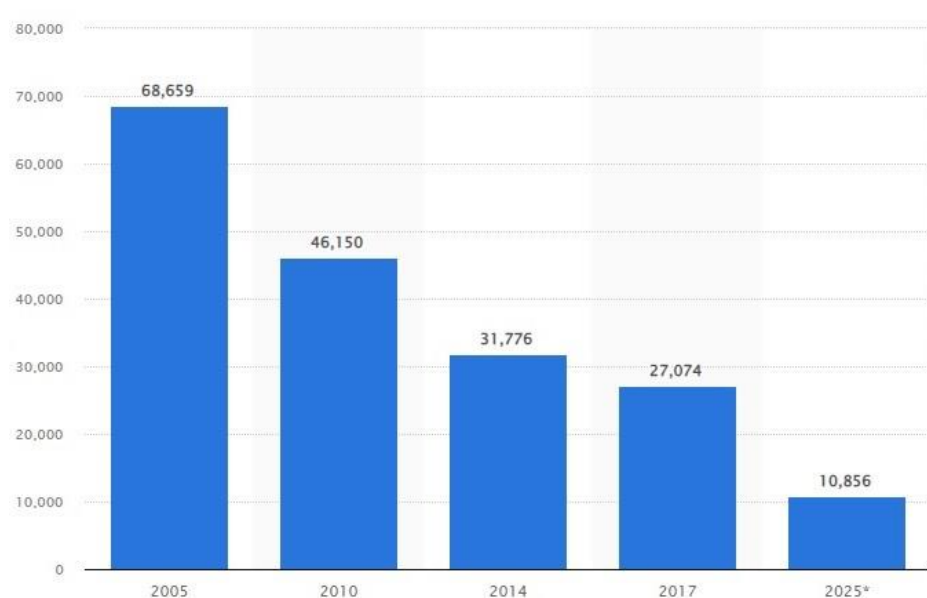
7 pav. Pasaulyje kasmet parduodamų robotų skaičius (tūkstančiais) [10]

Didžiausias skaičius robotų naudojamas elektros ir elektronikos komponentų gamyboje, šiek tiek mažiau automobilių pramonėje, mažiausiai maisto (žr. 8 pav.).



8 pav. Kasmetinis pramoninių robotų įrengimo pasiskirstymas [10]

Taip sparčiai augantis robotų populiarumas ir jų pagaminimo galimybės stipriai įtakoja ir pačių robotų kainą (žr. 9 pav.). Tai reiškia, kad robotų integravimas į gamybą įmonėms tampa vis prieinamesnis.



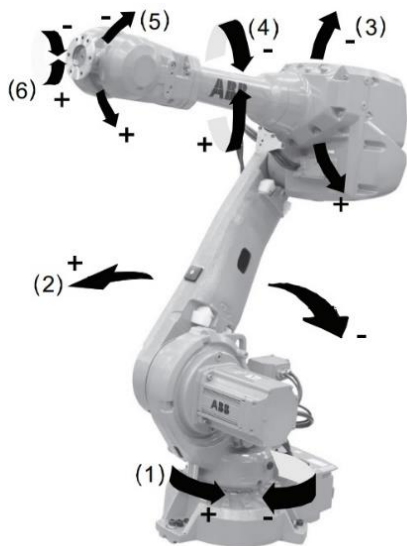
9 pav. Pramoninių robotų kainų pokytis (kainos JAV doleriais) [2]

Robotikos diegimo kaina gali gerokai viršyti roboto kainą. Be įrengimo išlaidų, gamykloms gali tekti sukurti atskiras darbo zonas arba papildomus atsarginius maitinimo blokus, kad būtų galima įdiegti robotą. Jau nekalbant apie periferines technologijas, tokias kaip jutikliai, kintami roboto griebtuvai ir bet

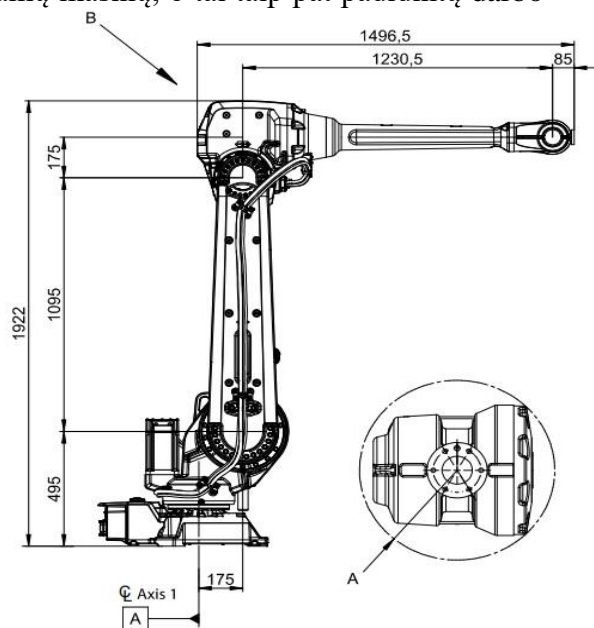
kokia reikalinga tvirtinimo įranga. *Boston Consulting Group* ataskaitoje teigiama, kad norint gauti patikimą robotų sąnaudų sąmatą, klientai turėtų padauginti roboto kainą mažiausiai iš trijų. Tarkime, šešių ašių robotas kainuoja 60 000 Eur, todėl klientai investicijoms turėtų skirti 187 000 Eur. Vis dėlto, jei robotui prireiktų išsamesnio įrangos remonto, pavyzdžiui, pridėti pagalbinių mechanizmų ar konvejerių, gali reikėti padauginti keturis ar penkis kartus daugiau nei roboto kaina.

Tada, žinoma, reikia apsvarstyti kintamąsias išlaidas. Tai apima darbo, energijos, medžiagų, nuolatinės priežiūros ir gamybos reikmenis, reikalingus sėkmingam roboto diegimui. Dėl skirtingo gamybos įrenginių pobūdžio šios išlaidos gali labai svyruoti priklausomai nuo pramonės sektoriaus ir veiklos dydžio. Be to, šios išlaidos ne visada yra linijinės. Pavyzdžiui, priežiūros išlaidos gali labai pasikeisti per mašinos gyvavimo ciklą.

Tyrimui pasirinktas ABB firmos pramoninis 6 ašių robotas IRB 4600 (žr. 10, 11 pav.), jo kaina yra apie 35 000 eurų. ABB IRB 4600 yra labai produktyvus bendrosios paskirties robotas, tai gana kompaktiškas robotas. ABB IRB 4600 užtikrina didesnę gamybos našumą ir aukštesnę kokybę, o tai reiškia didesnę pelną. Šio roboto pasiekiamumas yra iki 2,55 metro, o kelti jis gali svorius sveriančius net iki 60 kg. [12] Plona alkūnė už 3 ašies, mažos apatinės ir viršutinės rankos bei kompaktiškas riešas – visa tai prisideda prie kompaktiškiausio savo klasėje roboto. Su IRB 4600 galima sukurti savo darbo vietą mažesniame plote, pastatydami robotą arčiau aptarnaujamų mašinų, o tai taip pat padidintų darbo našumą.



10 pav. ABB IRB 4600 pramoninis robotas [16]



11 pav. Pramoninio roboto ABB IRB 4600 matmenys [16]

Pagrindiniai roboto apkrovimo duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė

ABB IRB 4600 roboto techniniai duomenys [15]

Roboto svoris	425 kg
Maksimali apkrova	60 kg
Maksimalus riešo sukimo momentas 4 ir 5 ašims	200 Nm
Maksimalus riešo sukimo momentas 6 ašiai	105 Nm

Šis ABB firmos robotas pasižymi itin dideliu pozicionavimo tikslumu ir plačiu judėjimo diapazonu.

2.2 lentelė

Roboto ašių judėjimo diapazonai [15]

Ašis	Judėjimo tipas	Judėjimo diapazonas
1	Sukimasis	+180° iki -180°
2	Rankos judėjimas	+150° iki -90°
3	Rankos judėjimas	+75° iki -180°
4	Sukimasis	+400° iki -400°
5	Lenkimasis	+120° iki -125°
6	Sukimasis	+400° iki -400°

2.2 Stacionarios robotų darbo vietos

Siekiant kuo tiksliau palyginti kuri sistema pranašesnė reikia apskaičiuoti abiejų sistemų įsigijimo ir metinę priežiūros kainą. Kadangi metalo apdirbimo mašinos yra didelių gabaritų nuo vieno roboto iki kito gaminy s keliauja konvejeriais. 2.3 lentelėje pateiktos išlaidos visos sistemos įsigijimui bei priežiūrai. Tam, kad išvengti gedimų reikalinga kas 6 mėnesius atlikti robotų patikras ir kalibravimą. Visa periferinė įranga kainuos apie 40 tūkst. eurų. Į šią kainą įtraukti griebtuvai, sensoriai, saugumo įranga. Didelę dalį išlaidų sudaro robotizuotos sistemos programavimo ir montavimo darbai, remiantis įmonių atliekančių šias paslaugas duomenimis roboto kaina sudaro tik 1/3 bendros sistemos kainos.

Robotas turės paimti detalę, įdėti ją į tekimo stakles, staklėms baigus savo darbą vėl paimti detalę bei įdėti į kitą mašiną. Antrajai mašinai baigus apdirbimo darbus paimti ir padėti ant konvejerio.

2.3 Lentelė

Išlaidos 2 robotų darbo vietai

Pavadinimas	Kaina, Eur
2 robotai ABB IRB 4600	70 000
4 m konvejeris	4 000
Periferinė įranga	40 000
Projektavimas ir diegimas	208 000
Iš viso:	322 000

Iš 2.3 lentelės matyti, kad robotai ir jų įrengimas kainuos apie 322 tūkstančius eurų. Robotai yra patikimi, o jų priežiūros išlaidos minimalios. Pirmuosius 5 metus įprastinės priežiūros išlaidos yra 500 Eur, už tepimą ir galimą akumulatoriaus priežiūrą. Priklausomai nuo atliekamo proceso po 5 metų naudojimo gali tekti pakeisti susidėvėjusias dalis, tai kainuoja apie 5000 Eur vienam robotui. Po dešimties metų naudojimo gali tekti atnaujinti programas, tai vidutinio dydžio robotui kainuoja apie 30 000 Eur. kasmetinės išlaidos tūkstantį eurų.

Standartinis daugumos konvejerių greitis yra 0,3 metro per sekundę, o tai atitinka vidutinį greitį, kurį žmogus vaikšto nešdamas 20 kilogramų dėžę. [4]

2.3 Robotas su linijine judėjimo sistema

Renkantis linijinę judėjimo sistemą svarbiausi faktoriai yra didžiausia leistina apkrova bei pakartojamumo tikslumas. Naudotos linijinės judėjimo sistemos kaina prasideda nuo 5-10 tūkstančių eurų, priklausomai nuo stovio bei ilgio. Indijos gamintojai *Automech Robotics* siūlo naujas linijines judėjimo sistemas pramoniniams robotams nuo 5 000 Eur. Žinomų gamintojų, tokių kaip KUKA, ABB linijinės judėjimo sistemos kaina šiek tiek didesnė, ji svyruoja nuo 15 iki 30 tūkstančių Eur. Tyrimui pasirinkta ABB firmos IRBT 4004 linijinė judėjimo sistema (žr. 12 pav.). Šios linijinės judėjimo sistemos pagrindinės techninės charakteristikos pateiktos 2.4 lentelėje. ABB firmos linijinė judėjimo sistema pasirinkta todėl, kad ji dirbs su ABB firmos pramoniniu robotu. To pačio gamintojo įrenginius daug lengviau suprogramuoti, kad jie dirbtų kuo sklandžiau. Taip pat šios ABB firmos linijinės judėjimo sistemos pakartojamumo tikslumas yra 0,002 mm.

ABB IRBT 4004 techniniai duomenys [13]

Galimas ilgis	Nuo 1,9 m iki 19,9 m
Greitis	2 m/s
Ilgis	5 m
Montavimo tipas	Ant grindų
Robotų skaičius	1 arba 2
5 m. ilgio sistemos svoris	~2 400 kg



12 pav. ABB IRBT 4004. [17]

Siekiant kuo tiksliau apskaičiuoti kuri sistema reikalauja mažiau išlaidų, bet atsipirkimo laikotarpis yra mažesnis, naudojame tą patį ABB firmos robotą IRB 4600. Pagal pasirinktą procesą norint, kad vienas robotas aptarnautų visas mašinas reikalinga 5 metrų ilgio linijinė judėjimo sistema. Jos kaina pasak gamintojo kartu su robotu yra 50 000 Eur. 2.5 lentelėje pateikta išlaidų suvestinė antros modernizacijos atveju.

Roboto su linijine judėjimo sistema išlaidos

Pavadinimas	Kaina, Eur
ABB IRB 4600 robotas su 5 m ilgio ABB IRBT 4004 linijinė judėjimo sistema	50 000
Periferinė įranga	20 000
Projektavimas ir diegimas	100 000
Iš viso	170 000

Iš 2.5 lentelės matyti, kad roboto su linijine judėjimo sistema įsigijimas ir įrengimas kainuos 170 000 Eur. Kasmetinės išlaidos lyginant su pirmąja modernizacija sumažėjo, kadangi reiks prižiūrėti tik vieną robotą ir linijinę judėjimo sistemą jos sieks 800 Eur.

2.4 Atsiperkamumo patikrinimas

Siekiant patikrinti abiejų sistemų atsiperkamumą pasinaudojome internete esančia atsiperkamumo skaičiuokle – *ROI Robot System Value Calculator* [17]. Skaičiuokle patikriname dviejų ABB firmos robotų sistemos atsiperkamumo laikotarpį lyginant su 4 žmonių trijų pamainų darbą šešias dienas per savaitę. Kadangi darbas nėra kvalifikuotas, darbuotojams mokamas minimalus atlyginimas.

Taip pat skaičiuoklėje reikia įvesti – kiek laiko robotai dirbs per dieną, savaitę ir metus, kiek darbuotojų pakeis robotai, kokios dalies darbuotojų reikės operacijai prižiūrėti, koks bus naudingumo padidėjimas (žr. 13 pav.).

The screenshot shows a web-based calculator interface with a dark background. At the top, it displays 'Bendra sistemos kaina: USD 322,000' and 'Robotų kiekis: 2'. The main section is titled 'DABARTINIŲ VEIKLOS IŠLAIDŲ KINTAMIEJI'. It contains six numbered input fields:

- 1. **Roboto sistemos naudojimas:** Includes a note 'Atsakomybės apribojimas: vidutinės roboto elektros išlaidos yra maždaug 0,50 USD per valandą'. It has two dropdown menus: 'Pamainos/diena' (set to 3) and 'Dienos/Savaitė' (set to 6). A 'Savaitės/Metai' dropdown is set to 50.
- 2. **Metinės darbo sąnaudos vienam operatoriui, įskaitant papildomas išmokas:** A text input field containing '\$ 6,216'. It includes the same note as item 1.
- 3. **Per vieną pamainą pašalintų operatorių skaičius:** A text input field containing '4'.
- 4. **Darbo jėgos, išlaikomos operacinėje sistemoje per pamainą, procentas:** A text input field containing '8' followed by a '%' sign.
- 5. **Numatomas produktyvumo padidėjimas:** A text input field containing '10' followed by a '%' sign.
- 6. **Kitas numatomas sutaupymas:** A text input field containing '\$ 0'. It includes a note: 'Papildomas pareiškimas: Mes nustatėme, kad dažnai yra daugybė papildomų nenumatytų arba specifinių pramonės šakų verčių, susijusių su robotų sistemų diegimu, pvz., lauko / perdūrimo taupymas, medžiagų taupymas ir kt.'

13 pav. Išlaidų suvedimas į skaičiuoklę

Dviejų robotų darbą gali atlikti 3 pamainos po 4 darbuotojus. Pateikti rezultatai (žr. 14 pav.), pagal skaičiuoklės duomenis – pakeičiant visus darbuotojus dviem robotais atsipirkimas bus po penkerių metų. O numatomas produktyvumo padidėjimas per 15 metų atneš papildomą 118,6 tūkstančių pelną, kadangi robotas gali dirbti greičiau nei darbuotojas ir jam nereikia pertraukų.

Metai	Sistemos kaštai ②	Priežiūros išlaidos ②	Veiklos kaštai* ②	Darbo taupymas** ②	Produktyvumo taupymas*** ②	Kitos santaupos	Metinis pinigų srautas	Kaupiamasis pinigų srautas
1	322 000 USD	1000 USD	10 800 USD	68 625 USD	6 862 USD	0 USD	-258 313 USD	-258 313 USD
2		1000 USD	11 016 USD	69 997 USD	7000 USD	0 USD	64 981 USD	-193 332 USD
3		1000 USD	11 236 USD	71 397 USD	7140 USD	0 USD	66 300 USD	-127 032 USD
4		1000 USD	11 461 USD	72 825 USD	7 283 USD	0 USD	67 646 USD	-59 385 USD
5		10 000 USD	11 690 USD	74 282 USD	7 428 USD	0 USD	60 019 USD	634 USD
6		1000 USD	11 924 USD	75 767 USD	7577 USD	0 USD	70 420 USD	71 054 USD
7		1000 USD	12 163 USD	77 282 USD	7728 USD	0 USD	71 848 USD	142 902 USD
8		1000 USD	12 406 USD	78 828 USD	7 883 USD	0 USD	73 305 USD	216 207 USD
9		1000 USD	12 654 USD	80 405 USD	8 040 USD	0 USD	74 791 USD	290 999 USD
10		60 000 USD	12 907 USD	82 013 USD	8 201 USD	0 USD	17 307 USD	308 306 USD
11		1000 USD	13 165 USD	83 653 USD	8 365 USD	0 USD	77 853 USD	386 159 USD
12		1000 USD	13 428 USD	85 326 USD	8533 USD	0 USD	79 430 USD	465 589 USD
13		1000 USD	13 697 USD	87 033 USD	8703 USD	0 USD	81 039 USD	546 628 USD
14		1000 USD	13 971 USD	88 773 USD	8 877 USD	0 USD	82 680 USD	629 308 USD
15		1000 USD	14 250 USD	90 549 USD	9 055 USD	0 USD	84 353 USD	713 661 USD
iš VISO		83 000 USD	186 769 USD	1 186 755 USD	118 675 USD	0 USD		

*vidutinio dydžio robotui; mažas robotas suvartoja 1/10 energijos, o didelis robotas – du kartus. Manoma, kad elektros energijos sąnaudų metinė infliacija yra 2 %
**I laikoma 1,02% metinės infliacijos darbo jėgos sąnaudomis
*** Reikalinga papildoma darbo jėga tokiai pačiai produkcijai kaip ir robotų sistema

14 pav. Skaičiuoklės rezultatai

Antroje sistemoje kurioje naudojamas tik vienas robotas sumontuotas ant linijinės judėjimo sistemos atsiperkamumas rodomas jau po pusterčių metų (žr. 15 pav.). Tai lemia daug mažesnė įrangos bei projektavimo, programavimo darbų kaina.

Metai	Sistemos kaštai ②	Priežiūros išlaidos ②	Veiklos kaštai* ②	Darbo taupymas** ②	Produktyvumo taupymas*** ②	Kitos santaupos	Metinis pinigų srautas	Kaupiamasis pinigų srautas
1	170 000 USD	500 USD	5400 USD	68 625 USD	6 862 USD	0 USD	-100 413 USD	-100 413 USD
2		500 USD	5508 USD	69 997 USD	7000 USD	0 USD	70 989 USD	-29 424 USD
3		500 USD	5618 USD	71 397 USD	7140 USD	0 USD	72 419 USD	42 995 USD
4		500 USD	5731 USD	72 825 USD	7 283 USD	0 USD	73 877 USD	116 872 USD
5		5000 USD	5845 USD	74 282 USD	7 428 USD	0 USD	70 865 USD	187 736 USD
6		500 USD	5962 USD	75 767 USD	7577 USD	0 USD	76 882 USD	264 618 USD
7		500 USD	6 081 USD	77 282 USD	7728 USD	0 USD	78 429 USD	343 047 USD
8		500 USD	6 203 USD	78 828 USD	7 883 USD	0 USD	80 008 USD	423 055 USD
9		500 USD	6 327 USD	80 405 USD	8 040 USD	0 USD	81 618 USD	504 674 USD
10		30 000 USD	6 453 USD	82 013 USD	8 201 USD	0 USD	53 761 USD	558 434 USD
11		500 USD	6583 USD	83 653 USD	8 365 USD	0 USD	84 936 USD	643 370 USD
12		500 USD	6 714 USD	85 326 USD	8533 USD	0 USD	86 645 USD	730 015 USD
13		500 USD	6 849 USD	87 033 USD	8703 USD	0 USD	88 387 USD	818 402 USD
14		500 USD	6 985 USD	88 773 USD	8 877 USD	0 USD	90 165 USD	908 567 USD
15		500 USD	7125 USD	90 549 USD	9 055 USD	0 USD	91 978 USD	1 000 546 USD
iš VISO		41 500 USD	93 384 USD	1 186 755 USD	118 675 USD	0 USD		

15 pav. Skaičiuoklės rezultatai antros modernizacijos duomenimis

Turint atsiperkamumo laikotarpius galima pagal formulę paskaičiuoti išlaidas pasirinktam laikotarpiui. Numatomos išlaidos įrengus robotizuotą gamybos sistemą yra 25% nerobotizuotos gamybos darbo išlaidų.[19]

$$(L * d_{sqn}) + (p * L) + I + R;$$

čia L – laikotarpis, mėnesiais;
 p – sistemos priežiūros išlaidos mėnesiui, Eur;
 d_{sqn} – numatomos išlaidos naudojant robotizuotą sistemą;
 I – pradinės išlaidos sistemai, Eur;
 R – kapitalinio remonto išlaidos, Eur.

Norint apskaičiuoti įmonės išlaidas, jei būtų nuspręsta pradėti gamybą nenaudojant robotizuotos sistemos, naudojama formulė

$$(L * d_{atl} * d) + (I_p * d * L);$$

čia I_p – išlaidos pertraukoms ir prastovoms, Eur;
 d – Darbuotojų skaičius vienoje pamainoje;
 d_{atl} – mėnesinis vieno darbuotojo atlyginimas, Eur.

Vadovaudamasis Lietuvos Respublikos vyriausybės nutarimu dėl papildomų ir specialiųjų pertraukų tvarkos, darbdavys kas valandą suteikia darbuotojams ne trumpesnes kaip 10 minučių pertraukas. Darbdavio išlaidos vieno darbuotojo pertraukoms per mėnesį apskaičiuojamos pagal formulę:

$$X = \frac{d * p * dd}{dv}$$

čia d – mėnesinis darbo užmokestis;
 p – vienos darbo dienos pertraukų laikas, val;
 dd – darbo dienų skaičius per mėnesį;
 dv – darbo valandų skaičius per mėnesį, val.

$$X = \frac{518 * 1,2 * 21}{160}$$

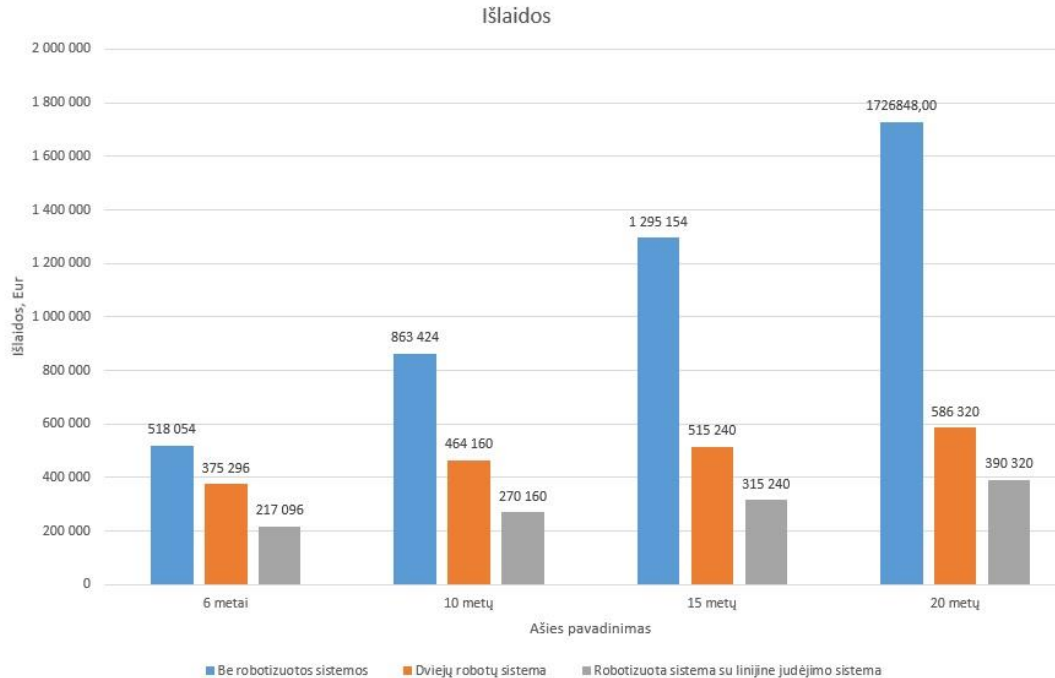
$$X = 81,6 \text{ Eur.}$$

2.6 lentelė

Išlaidos, Eur.

Laikotarpis	Be robotizuotos sistemos	Dviejų robotų sistema	Robotizuota sistema su linijine judėjimo sistema
6 metai	518 054	375 296	217 096
10 metų	863 424	464 160	270 160
15 metų	1 295 154	515 240	315 240
20 metų	1 726 848	586 320	390 320

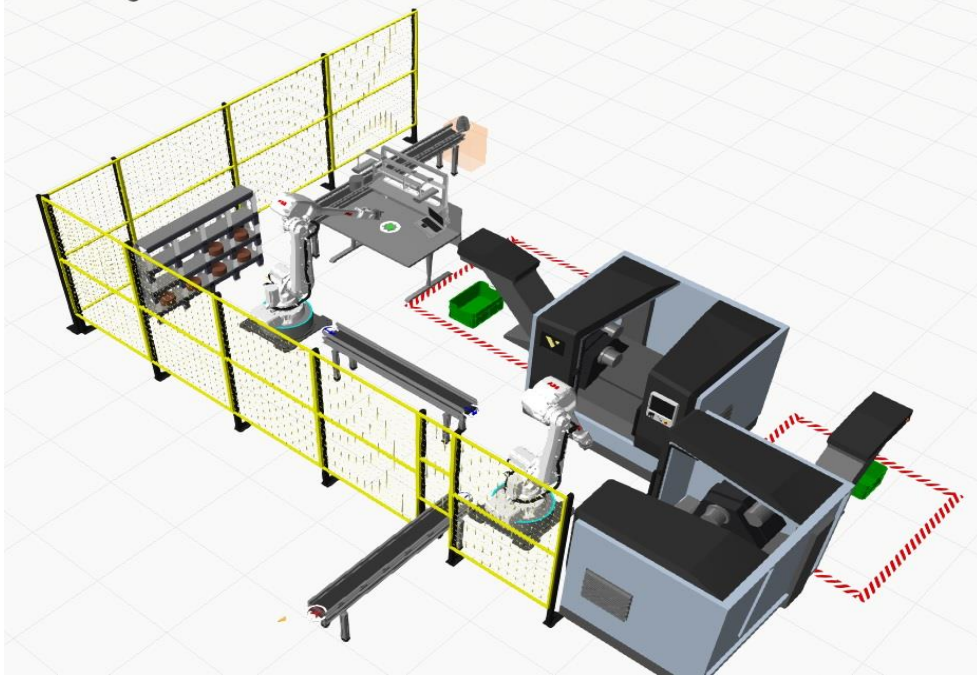
Visos išlaidos pateiktos 2.6 lentelėje, bei atvaizduotos grafiškai diagramoje (žr. 16 pav.).



16 pav. Išlaidų diagrama

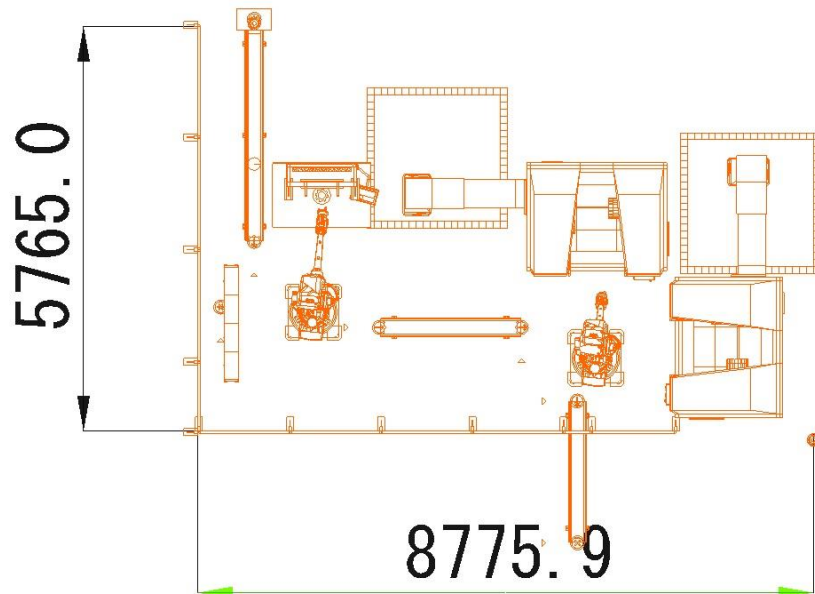
2.5 Patikrinimas *Visual Components* aplinkoje

1999 metais buvo įkurta „Visual Components“ įmonė kurios tikslas buvo, kad gamybos projektavimo ir modeliavimo technologija būtų kuo paprastesnė, patogesnė naudoti ir prieinama bet kokio dydžio gamybos organizacijoms. 2017 m. pasaulinė automatikos korporacija „Kuka“ kurios pardavimai siekia apie 3,3 milijardo eurų ir kurioje dirba apie 14 tūkstančių darbuotojų įsigijo „Visual Components“. Atsižvelgiant į tai programos naudotojai gali būti užtikrinti, kad gauti duomenys yra tikslūs ir priimti pagal tai tinkamus sprendimus. Šia programa kuriant simuliacijas galima pašalinti klaidas bei sumažinti išlaidas, apskaičiuoti tikslų gamybinių patalpų plotą. sumodeliuota dviejų robotų atliekamo proceso vizualizacija (žr. 17 pav.).



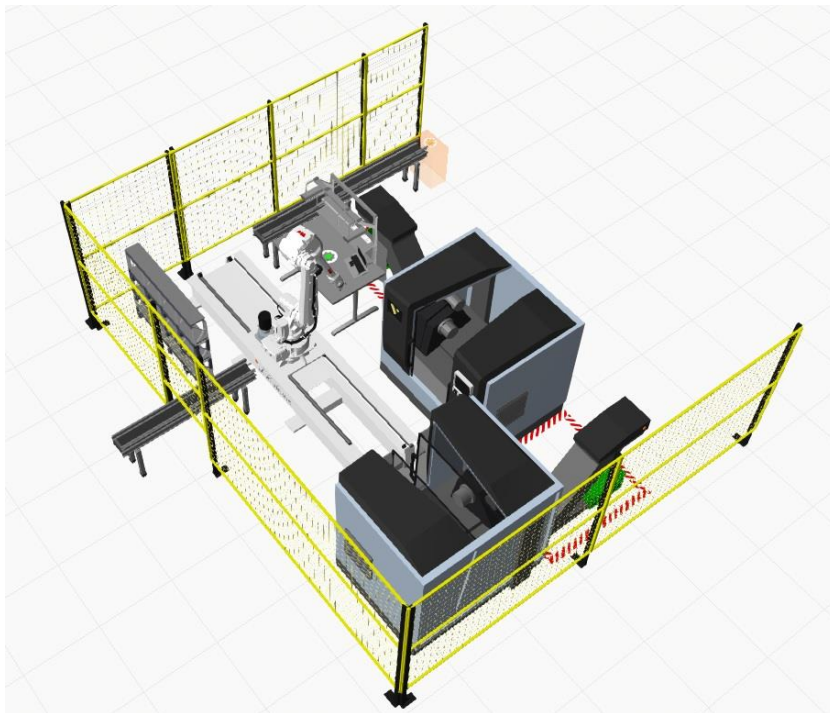
17 pav. Visual Components programa sukurta dviejų robotų darbo vizualizacija

Kaip matome dviejų robotų darbo vieta gaminio tekinimo procese užima apie 50 kvadratiųjų metrų gamybinių patalpų ploto (žr. 18 pav.). Procese naudojamos dvi tekinimo staklės, pirmosios ruošinį apdirba per 3 minutes, tuomet robotas perkelia ruošinį į antrąsias galutiniam apdirbimui, ten ruošinys tekinamas dar dvi minutes, pagaminti 10 gaminių pagal *Visual Components* programą užtruko 27 minutes.



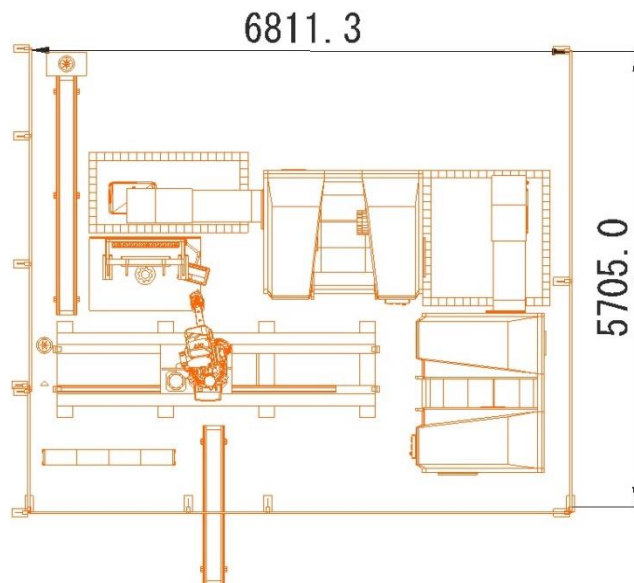
18 pav. Dviejų robotų darbo vietos užimamas plotas

Sumodeliavus antrąją simuliaciją (žr. 19 pav.), kurioje dviejų robotų darbą atlieka vienas ABB firmos robotas sumontuotas ant ABB firmos linijinės judėjimo sistemos iškart matome mažesnę užimamą patalpų plotą.

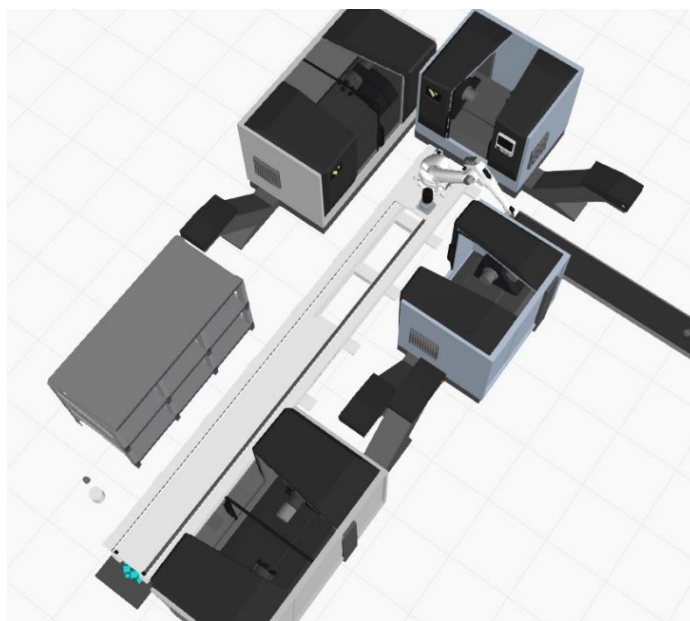


19 pav. Roboto su linijine judėjimo sistema vizualizacija

Kadangi linijinė judėjimo sistema padidina roboto darbo plotą, gaminio apdirbimo stakles galima sustatyti kitaip ir taip sutaupyti apie 11 kvadratinių metrų ploto (žr. 20 pav.). Tačiau kur kas svarbesnis linijinės judėjimo sistemos privalumas yra roboto darbo zonos padidinimas siekiant aptarnauti daugiau įrenginių. Kadangi tekinimo procesas užima laiko, vienas robotas gali aptarnauti ne dvi, o keturias tekinimo stakles (žr. 21 pav.). Robotas aptarnaudamas 4 tekinimo stakles kurios ruošinį apdirba tiek pat laiko kaip pirmojoje simuliacijoje 10 gaminių pagaminama per 20 minučių.



20 pav. robotizuotos darbo vietos su linijine judėjimo sistema brėžinys



21 pav. Visual Components programa sukurta vizualizacija su linijine judėjimo sistema

Atsižvelgiant į šiuo metu siūlomų gamybinių patalpų nuomos kainas kurios yra 1,5 euro už vieną kvadratinį metrą mėnesiui, įmonė patalpų nuomai kas mėnesį sutaupys 16,5 Eur. Per 15 metų gamybos laikotarpį beveik 3 tūkstančius eurų.

Taip pat *Visual Components* programa sukurta vizualizacijos leidžia įmonių vadovams taikyti *Lean* sistemos principus.[7] Dar nepradėjus gamybos galime užkirsti kelią nereikalingoms išlaidoms, įvertinti ar tikrai atnaujinta sistema užtikrins didesnę įmonės pelną.

IŠVADOS

1. Darbe atliktas technologinio proceso efektyvumo tyrimas, kai naudojama dveji robotai ir robotas su linijine judėjimo sistema.
2. Tyrimas atliktas Visual Components modeliavimo programa.
3. Tyrimas parodė, kad technologinio proceso robotizavimas (naudojant tiek dviejų robotų, tiek ir roboto su linijine judėjimo sistema) ekonomiškai yra naudingas.
4. Roboto su linijine judėjimo sistema eksploatacinės išlaidos 6-20 m. laikotarpiu yra 1,5-1,7 karto mažesnės, nei dviejų robotų sistemos. O sistemos atsiperkamumas 2 kartus greitesnis.

LITERATŪRA

1. A History of Industrial Robots, [žiūrėta 2022-03-21]. Prieiga per internetą: <https://www.wevolver.com/article/a-history-of-industrial-robots>
2. Average cost of industrial robots in selected years from 2005 to 2017 with a forecast for 2025, [žiūrėta 2022-04-19]. Prieiga per internetą: <https://www.statista.com/statistics/1120530/average-cost-of-industrial-robots/>
3. Bakšys B.; Fedaravičius A. 2004. *Robotų technika*. Kaunas: Technologija. 493 p.
4. Calculating Conveyor Speeds, [žiūrėta 2022-05-09]. Prieiga per internetą: <https://www.cisco-eagle.com/category/3363/calculating-conveyor-speed>
5. D. Bičkauskės komentaras: verslui teks dar labiau pasitempti – atkeliauja Pramonė 5.0, [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-21]. Prieiga per internetą: <https://lic.lt/2021/01/21/d-bickauskės-komentaras-verslui-teks-dar-labiau-pasitempti-atkeliauja-pramone-5-0/>
6. Eurostat statistikos departamento nelaimingų atsitikimų darbe statistikos duomenys, [žiūrėta 2022-03-21]. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics#Analysis_by_activity
7. Essential Principles for a Lean System, [žiūrėta 2022-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.planview.com/resources/articles/essential-principles-lean-system/>
8. Ford M., Robotų era: technologijų pažanga ir ateitis be darbo, Vilnius, 2017. 336 p.
9. Industrial Revolution, [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution>
10. IFR presents World Robotics 2021 reports, [žiūrėta 2022-04-19]. Prieiga per internetą: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again>
11. Industrial Revolution, [žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga per internetą: <https://www.history.com/topics/industrial-revolution/industrial-revolution>
12. IRB 4600, [žiūrėta 2022-04-19]. Prieiga per internetą: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600>
13. IRBT 4004/6004/7004 Track Motions for robots, [žiūrėta 2022-05-08]. Prieiga per internetą: https://library.e.abb.com/public/890958c5e98649a28a1ceba0f377938d/PR10335EN_R3_IRBT_X004_trackmotion.pdf

14. IRBT 4004, [žiūrėta 2022-05-08]. Prieiga per internetą: <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/robot-positioners-track-motion/irbt-4004-for-irb-4400>
15. Pramonė, [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.vle.lt/straipsnis/pramone/>
16. Product specification - IRB 4600, [žiūrėta 2022-05-04]. Prieiga per internetą: <https://library.e.abb.com/public/edf77a4717154185ab863b85f9333138/3HAC032885%20PS%20IRB%204600%20on%20IRC5-en.pdf>
17. ROI Robot System Value Calculator, [žiūrėta 2022-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.automate.org/robotics-roi-calculator-answer>
18. Statistinių rodiklių analizė [žiūrėta 2022-01-19]. Prieiga per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?hash=c5d4f34e-37fb-4d45-b13c-5b6eb1d0c#/>
19. Steven Douglas corp Blog, [žiūrėta 2022-05-09]. Prieiga per internetą: <https://sdcautomation.com/calculating-the-estimated-roi-of-your-automation-project/#/>
20. Timeline of Revolutions, [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://manufacturingdata.io/newsroom/timeline-of-revolutions/>
21. Wallén; Johanna 2008. *The History of the Industrial Robot*. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2008. 18 p.
22. What are Linear Robotics?, [interaktyvus] [žiūrėta 2022-01-19]. Prieiga per internetą: <https://www.automate.org/tech-papers/what-are-linear-robotics>