



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Pusiau automatizuoto pavaros mazgo surinkimo proceso kūrimas

Baigiamasis magistro projektas

Ignas Rimkus
Projekto autorius

Doc. dr. Rūta Rimašauskienė
Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Pusiau automatizuoto pavaros mazgo surinkimo proceso kūrimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Ignas Rimkus
Projekto autorius

Doc. dr. Rūta Rimašauskienė
Vadovė

Doc. dr. Neringa Keršienė
Recenzentė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Ignas Rimkus

Pusiau automatizuoto pavaros mazgo surinkimo proceso kūrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Ignas Rimkus

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Ignui Rimkui

1. Projekto tema –

Pusiau automatizuoto pavaros mazgo surinkimo proceso kūrimas

(Lietuviškai)

Development of a Semi-Automated Drive Unit Assembly Process

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: sukurti pusiau automatizuotą pavaros mazgo surinkimo proceso sistemą.

1. išnagrinėti pusiau automatizuotų surinkimo procesų valdymo principus, Lean metodų taikymo galimybes ir šiuolaikinių technologijų integracijos aspektus;
2. sudaryti pusiau automatizuoto proceso loginę seką ir parengti jos algoritmą TIA Portal programoje;
3. atlikti palyginamąją surinkimo procesų analizę prieš pokyčius ir po jų įgyvendinimo;
4. įvertinti pavaros mazgo surinkimui naudojamos įrangos ir įtaisų kaštus.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Sistema kuriama taikant Lean ir Poka-Yoke principus, naudojant Siemens PLC ir TIA Portal programinę aplinką. Mechaninės pusiau automatizuotos įrangos dalys projektuojamos naudojant CAD programą Solid Edge.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Ignas Rimkus

2025-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovė

Rūta Rimašauskienė

2025-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2025-09-30

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Ignas Rimkus. Pusiau automatizuoto pavaros mazgo surinkimo proceso kūrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovė doc.dr. Rūta Rimašauskienė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybės inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: kontrolė; surinkimas; PLC; Poka–Yoke.

Kaunas, 2026. 66 p.

Santrauka

Šiame projekte buvo ištirta rankinio pavaros mazgo surinkimo proceso eiga ir sukurta pusiau automatizuota sistema, kuri skirta sumažinti žmogaus klaidų tikimybę bei stabilizuoti galutinio gaminio kokybę. Pagrindinė problema buvo susijusi su tuo, kad rankiniu būdu atliekamos operacijos pasižymėjo aukštomis *FMEA RPN* reikšmėmis, nes klaidos dažnai likdavo nepastebėtos realiu laiku, o brangių mechaninių ir elektroninių komponentų surinkimas keldavo papildomą riziką. Tyrimo metu buvo suprojektuotos trys nuosekliai veikiančios pusiau automatizuotos įrangos, sudarančios vieningą surinkimo sistemą, kurioje pritaikyti *Poka–Yoke* sprendimai, mechaniniai fiksavimo elementai, lazeriniai, induktyviniai ir foto jutikliai žingsninė *Siemens PLC* logika bei *HMI* vizualinės instrukcijos. Eksperimentinės analizės metu buvo atliktas ciklo laiko vertinimas ir sudarytos *FMEA* lentelės prieš įrangos diegimą ir po jo, siekiant įvertinti, koku mastu buvo sumažintos žmogiškųjų klaidų rizikos. Nustatyta, kad bendras surinkimo ciklas sutrumpėjo vidutiniškai 16 %, o didžioji dalis rankinio proceso rizikų buvo sumažinta 62–93 %, priklausomai nuo operacijos pobūdžio; vidutinė *RPN* reikšmė sumažėjo nuo 224 iki 46, t. y. apie 79 %. Buvo įrodyta, kad pusiau automatizuotos sistemos tikrinimo priemonės ženkliai pagerino varžtų prisukimo, guminių detalių, klijų panaudojimo ir sujungimų tikrinimo patikimumą. Apibendrinant galima teigti, kad pusiau automatizuota sistema leido sukurti stabilesnį, aiškiai valdomą ir patikimesnį surinkimo procesą, kuriame didžioji dalis žmogiškojo faktoriaus rizikų buvo panaikintos arba tapo lengvai valdomos, o proceso kokybė nepriklauso nuo operatoriaus patirties. Gauti rezultatai gali būti taikomi praktinėje gamybinėje aplinkoje, siekiant sumažinti broką, pagreitinoti procesą ir padidinti kokybės kontrolės tikslumą.

Rimkus Ignas. Development of a Semi-Automated Drive Unit Assembly Process. Master's Final Degree Project, supervisor assoc.prof.dr. Rūta Rimašauskienė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: control; assembly; PLC; Poka–Yoke.

Kaunas, 2026. 66 p.

Summary

In this project, the workflow of the manual drive-unit assembly process was examined and a semi-automated system was developed to reduce human-error probability and stabilize the final product quality. The main problem was related to the fact that manual assembly operations exhibited high *FMEA RPN* values, as errors were often not detected in real time, while the assembly of expensive mechanical and electronic components introduced additional risk. During the study, three sequentially operating semi-automated fixtures were designed, forming an integrated assembly system in which *Poka–Yoke* elements, mechanical positioning features, laser, inductive and photo sensors, step-based *Siemens PLC* logic, and *HMI* visual instructions were implemented. Experimental analysis included cycle-time evaluation and the creation of *FMEA* tables before and after system implementation to determine the extent to which human-factor risks were reduced. It was established that the overall assembly cycle decreased by approximately 16%, and that most manual-process risks were reduced by 62–93%. Depending on the operation, the average *RPN* value decreased from 224 to 46, representing a reduction of about 79%. The results demonstrated that automated checking mechanisms significantly improved the reliability of screw-tightening, rubber-seal installation, adhesive application, and connection verification. In summary, the semi-automated system enabled a more stable, clearly controlled, and reliable assembly process in which the majority of human-factor-related risks were either eliminated or became easily manageable, and the resulting process quality no longer depended on operator experience. The findings can be applied in practical manufacturing environments to reduce defects, increase process stability, and improve the accuracy of quality control.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Surinkimo proceso automatizavimo ir kokybės užtikrinimo teoriniai pagrindai	12
1.1. Surinkimo procesų automatizavimo aktualumas ir sprendimai gamyboje	12
1.2. <i>Poka-Yoke</i> ir <i>5S</i> principai gamyboje	15
1.3. Rizikos analizė ir <i>FMEA</i> taikymas gamyboje	17
1.4. 3D spausdinimo taikymas gamybos įmonėse	19
1.5. Skyriaus apibendrinimas	20
2. Situacijos prieš pokyčius analizė	22
2.1. Rankinio surinkimo procesas	22
2.2. Rankinio surinkimo laiko skaičiavimas ir problemos	24
2.3. Rizikos vertinimas taikant <i>FMEA</i>	25
2.4. Skyriaus apibendrinimas	27
3. Naujos sistemos diegimas ir lyginimas	28
3.1. Įrangos projektavimo pagrindimas	28
3.2. Įrangos projektavimas ir proceso loginė seka	29
3.2.1. Įrangos pirmas surinkimo mazgas	29
3.2.2. Įrangos antras surinkimo mazgas	34
3.2.3. Įrangos trečias surinkimo mazgas	38
3.3. Siūloma loginė seka.....	44
3.4. Programos valdymas ir darbo instrukcija <i>HMI</i> ekrane	48
3.5. Eksperimentinis vertinimas ir surinkimo proceso duomenų pateikimas	49
3.6. Rezultatų palyginamoji analizė	53
3.6.1. Palyginamoji analizė	53
3.6.2. Rizikų suvaldymas.....	55
3.7. Skyriaus apibendrinimas	56
4. Ekonominė dalis.....	58
4.1. Sunaudotos 3D spausdinimo medžiagos skaičiavimas.....	58
4.2. Įrangos savikainos skaičiavimas.....	60
4.3. Skyriaus apibendrinimas	62
Išvados	63
Literatūros sąrašas	64
Priedai.....	67
1 priedas. Pirmos įrangos loginė schema pateikta paveikslu.	67
2 priedas. Antros įrangos loginė schema pateikta paveikslu.	68
3 priedas. Trečios įrangos loginė schema pateikta paveikslu.	69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Sistemos <i>FMEA</i> rimtumo gairės (1-10 kokybinė skalė) [21].....	18
2 lentelė. Rankinio surinkimo ciklo skaičiavimas.....	25
3 lentelė. Rankinio surinkimo <i>FMEA</i> skaičiavimas.....	25
4 lentelė. Pirmos įrangos loginės sekos žingsniai	45
5 lentelė. Antros įrangos loginės sekos žingsniai.....	45
6 lentelė. Trečios įrangos loginės sekos žingsniai	46
7 lentelė. Surinkimo ciklo skaičiavimas po pokyčių.....	50
8 lentelė. <i>FMEA</i> vertinimas po įrangos įdiegimo.....	51
9 lentelė. Prieš ir po pokyčių ciklo laikas	53
10 lentelė. <i>FMEA RPN</i> rezultatai prieš ir po.....	54
11 lentelė Pusiau automatizuotos pavaros mazgo surinkimo sistemos kaštų analizė	60
12 lentelė. Kaštų pasiskirstymas pagal kategorijas	61

Paveikslų sąrašas

1 pav. Bendradarbiaujančių robotų ir žmogaus darbo tipų schemas [4].....	13
2 pav. Metinis detalių komplektavimo kaštų palyginimas pagal sistemos tipą, nuo gamybos vienetų skaičiaus [8].....	15
3 pav. Pirmoje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas mazgas I.....	22
4 pav. Antroje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas mazgas II.....	23
5 pav. Trečioje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas pavaros blokas.....	23
6 pav. Detalės surinkimo brėžinys	23
7 pav. Rankinio surinkimo įranga prieš pokyčius. 1 – rankinis gumos prispaudėjas, 2 – 3D spausdintas įdėklas, 3 – įdėklas detalei pasidėti	24
8 pav. Pirmo įrangos mazgo bendras vaizdas	30
9 pav. Spynų valdymo loginė schema.....	30
10 pav. Mechaninis spynos sprendimas ir darbo pozicijos sekimas	31
11 pav. Detalės ir variklio įdėjimo žingsnis ir loginė schema	31
12 pav. Detalės bortas, kad neišimti detalės	32
13 pav. Klijų panaudojimo sekimo sprendimo loginė schema	32
14 pav. Klijų panaudojimo sekimo sprendimas	32
15 pav. Suktuko mygtuko adapteris, fiksuojantis paspaudimus ir varžtų įsukimo veiksmus. Veiksmo loginė schema	33
16 pav. Gumos patikrinimo loginė schema.....	34
17 pav. Pirmo įrangos mazgo trečia darbo pozicija. A- svirtinis mechanizmas, B- gumos būvimo, bei įdėjimo krypties patikrinimas lazeriu	34
18 pav. Antro įrangos mazgo bendras vaizdas.....	35
19 pav. Įsuktų varžtų patikrinimas ir teisingos krypties užtikrinimas lazeriu. Žingsnio veiksmų loginė schema	35
20 pav. Įrankio panaudojimo loginė schema.....	36
21 pav. Spyruoklinis tarpinės uždėjimo įrankis ir jo panaudojimas	36
22 pav. Tarpinės tikrinimo loginė schema	36
23 pav. Gumos tikrinimas kontrastiniu jutikliu nukreipiant spindulį į detalės griovelį ir žingsnio loginė schema	37
24 pav. Ketvirtos darbo pozicijos loginė schema	37
25 pav. Antro įrangos mazgo ketvirta darbo pozicija, dangtelio prisukimas.....	38
26 pav. Trečio įrangos mazgo bendras vaizdas.....	38
27 pav. Keturių varžtų patikrinimo loginė schema	39
28 pav. Stebulės užmovimas ir dangtelio 4 varžtų patikrinimas.....	39
29 pav. Varžtų prisukimo loginė schema.....	40
30 pav. Antros pozicijos spaustuvo prispaudimas ir varžtų prisukimas	40
31 pav. Paskutinių varžtų patikrinimas	41
32 pav. Varžtų tikrinimo trejais induktyviniais jutikliais loginė schema.....	42
33 pav. Dangtelio su laidu varžtų patikrinimas induktyviniais jutikliais.....	42
34 pav. Varžto patikrinimo principas, paremtas vėliavėlės, strypelio ir cilindro kombinacija ir jo loginė schema: 1 – varžto nėra; 2 – varžtas prisuktas teisingai; 3 – varžtas neprisuktas iki galo	43
35 pav. Pavaros variklio ir jungties patikrinimas.....	44
36 pav. Nuosekli surinkimo proceso loginė schema ir trijų įrangų veikimo ciklai.....	47

37 pav. HMI ekrano būsenos: A – instrukcija, B – klaida, C – pakartojimas.....	48
38 pav. HMI ekranas skirtas sistemos rankiniam valdymui	48
39 pav. Ekranas skirtas pasirinkti darbo režimą	49
40 pav. Ekranų keitimas programoje	49
41 pav. Surinktos darbo vietos vaizdas. a – įrangos pirmas mazgas, b – įrangos antras mazgas, c – įrangos trečias mazgas	50
42 pav. Stulpelinis grafikas: ciklo laikai prieš ir po pakeitimo	53
43 pav. <i>FMEA RPN</i> rezultatai prieš ir po.....	55
44 pav. „Bambu Studio“ programoje naudoti modeliai ir programos apskaičiuota masė gramais...	58
45 pav. Kaštų pasiskirstymas pagal kategorijas, išreikšta procentais.	62

Ivadas

Šiuolaikinėje gamyboje vis didesnę dėmesį lemia ne tik gaminių kaina, bet ir kokybė, stabilumas bei galimybė išvengti žmogiškųjų klaidų. Dėl augančių konkurencinių reikalavimų įmonės privalo užtikrinti, kad jų gamybos procesai būtų kuo patikimesni, o galutiniai gaminiai – atitiktų griežtus kokybės standartus. Rankinis surinkimas vis dar plačiai naudojamas gamyboje, tačiau būtent šiame procese dažniausiai atsiranda žmogiškos klaidos, kurios tiesiogiai veikia gaminio kokybę ir procesų stabilumą. Didelė priklausomybė nuo operatoriaus įgūdžių, dėmesio, patirties, nuovargio ar net psichologinės būsenos lemia tai, kad rankiniame procese dažnai pasitaiko klaidų, kurios gali sukelti broką, papildomas išlaidas ir prastovas. Situacija tampa dar jautresnė tuomet, kai surenkamas mazgas turi brangius elektroninius ar mechaninius komponentus, kurių pažeidimas ar neteisingas surinkimas įmonei gali sukelti ženklų nuostolį. Tokiuose procesuose ne tik didėja finansinė rizika, bet ir atsiranda būtinybė užtikrinti atkuriamumą – kad kiekvienas gaminys būtų surinktas identišškai ir be nukrypimų. Dėl šių priežasčių tampa būtina ieškoti sprendimų, kurie sumažintų žmogaus faktorių ir leistų procesą kontroliuoti patikimiau, ypač tais atvejais, kai gaminys yra kompleksiškas, o surinkimo seka – griežtai apibrėžta. Prieš pradedant šį projektą buvo aišku, kad rankinis surinkimas kelia daugiausiai rizikų: darbai atliekami nevienodu tempu, žingsniai kartais praleidžiami, o klaidos pastebimos ne iš karto. Tyrimai ir praktinė patirtis rodo, kad rankiniu būdu atliekami surinkimo žingsniai dažniausiai pasižymi aukšta rizika, nes klaidos tokiose operacijose aptinkamos sunkiai ir ne visada realiu laiku. Siekiant išvengti šių problemų, gamyboje vis dažniau taikomi paprasti automatiniai tikrinimo sprendimai – jutikliai, žingsninė PLC logika, sekos kontrolė ar *Poka–Yoke* priemonės, kurios padeda sumažinti riziką ir stabilizuoti galutinio gaminio kokybę. Vis dėlto ne visais atvejais procesą įmanoma visiškai automatizuoti. Kai kurie veiksmai išlieka priklausomi nuo operatoriaus, todėl svarbu sukurti pusiau automatizuotą ir žmogų vedančią sistemą, kuri užtikrintų teisingą surinkimo eigą, sumažintų žingsnių praleidimo tikimybę ir leistų operatoriui dirbti nuosekliai, aiškiai suprantant proceso logiką. Tokia sistema turi ne tik padėti išvengti klaidų, bet ir suteikti grįžtamąjį ryšį – informuoti apie teisingą atliktą veiksmą, sustabdyti procesą netinkamų sąlygų atveju ir neleisti pereiti prie kito žingsnio, kol ankstesnis neatliktas tinkamai. Šis projektas siekia sukurti būtent tokį sprendimą – sistemą, kuri išlaiko operatoriaus dalyvavimą, tačiau eliminuoja daugumą kritinių rizikų, integruojant Siemens PLC logiką, HMI vizualines instrukcijas, jutiklius ir mechaninius *Poka–Yoke* elementus. Tokia kombinacija ne tik sumažina klaidų tikimybę, bet ir leidžia objektyviai įvertinti proceso pokyčius, palyginant rankinio ir pusiau automatizuoto proceso ciklo laikus bei *FMEA* rezultatus. Šio tyrimo nauda – praktinė ir tiesiogiai panaudojama gamybinėje aplinkoje, nes parodo, kaip pusiau automatizuota sistema gali pagerinti kokybę, sumažinti broką ir sukurti stabilesnį procesą, nepaisant operatoriaus patirties ar darbo tempo.

Tikslas: sukurti pusiau automatizuotą pavaros mazgo surinkimo proceso sistemą.

Uždaviniai:

1. išnagrinėti pusiau automatizuotų surinkimo procesų valdymo principus, Lean metodų taikymo galimybes ir šiuolaikinių technologijų integracijos aspektus;
2. sudaryti pusiau automatizuoto proceso loginę seką ir parengti jos algoritmą TIA Portal programoje;
3. atlikti palyginamąjį surinkimo procesų analizę prieš pokyčius ir po jų įgyvendinimo;
4. įvertinti pavaros mazgo surinkimui naudojamos įrangos ir įtaisų kaštus.

Hipotezė: Pusiau automatizuotas procesas padės išvengti pavaros mazgo surinkimo klaidų

1. Surinkimo proceso automatizavimo ir kokybės užtikrinimo teoriniai pagrindai

Norint sukurti pusiau automatizuotą surinkimo kontrolės sistemą reikia susipažinti su esamomis, buvusiomis, mokslininkų nagrinėtomis sistemomis, apžvelgti su kokiais iššūkiais susiduriama, kuriant automatizuotas sistemas bei, kaip reikia tai įgyvendinti, kad sistema veiktų sklandžiai. Svarbu išnagrinėti, kokie įrankiai naudojami siekiant automatizuoti tam tikrus gamybos procesus, pasitelkti tam tikrą gamybos filosofiją, kaip pavyzdžiui *Lean*, kad darbas vyktų sklandžiai, bei būtų aiškios tam tikros normos. Žinoma, darbo tikslas, kad įdiegta sistema anuliuotų visas galimas gamybos klaidas ir užtikrintų gaminio kokybę, tai pravartu žinoti kokios klaidos dažniausiai pasitaiko ir su kokiomis problemomis dažnai susiduriama gamybos procesuose. Taip pat svarbu apžvelgti šiuolaikines gamybos technologijas, ypač 3D spausdinimą, kuris leidžia greitai kurti prototipus, pagalbinus įtaisus ir *Poka-Yoke* elementus. Šios technologijos analizė padės įvertinti jos pritaikymo galimybes projektuojant pusiau automatizuotą surinkimo sistemą ir optimizuojant įrangos kaštus.

1.1. Surinkimo procesų automatizavimo aktualumas ir sprendimai gamyboje

Šiuolaikinėje pramonėje, gamybos sektoriuje, efektyviai ir kokybiškai atliekami procesai tampa vis svarbesni įmonės konkurencingumui. Įmonės, siekdamos pritraukti klientus ir patenkinti jų lūkesčius, diegia pažangias sistemas, kurios užtikrina gamybos operacijų efektyvumą ir kokybę. Dėl to šie veiksniai daro įtaką ir gaminio kaštams. Surinkimo procesai yra vieni iš jų – svarbu juos atlikti kokybiškai ir išvengti elementariausių klaidų. Įmonės privalo užtikrinti, kad klientas gaus visiškai surinktą kokybišką gaminį, nes net vienas neįsuktas varžtas gali sukelti gamybos prastovas, broką ar net kelti saugumo riziką vartotojui. Todėl įmonės, siekiančios kokybės ir efektyvumo, renkasi diegti automatizuotas tikrinimo sistemas, kurios geba aptikti klaidas realiu laiku ir užtikrina, kad gaminys po atliktos operacijos būtų visiškai paruoštas tolimesniems etapams. Šios darbo temos aktualumas kyla iš poreikio eliminuoti žmogaus klaidas ir kartu sukurti ergonomiškai pagrįstas darbo vietas bei technologiškai pažangias surinkimo sistemas.

Vienas iš gamybos proceso optimizavimo pavyzdžių yra žmogaus ir roboto bendradarbiavimo tyrimas. Viena iš naujesnių mokslinių darbų mokslininkai analizuoja, kaip efektyviai roboto ir žmogaus bendras darbas leidžia pasiekti geresnį darbo ergonomikos lygį ir didesnę darbo efektyvumą. Tyrime buvo nagrinėjamas gana sudėtingas surinkimo modelis, kuriame buvo surenkama daug detalių ir skirtingais surinkimo būdais. Surinkimas buvo atliktas keliais bandymais: kai surinkinėjo žmogus rankiniu būdu, kai surinkimą vykdė robotas ir kai procesas buvo atliekamas visiškai automatiškai. Tyrimo rezultatai parodė, kad roboto surinkimo operacija truko 70,8 procento ilgiau, nei surinkinėjant ranka, tačiau žmonės, kurie surinkinėjo detales, jautė ženkliai mažiau nuovargio bei psichologinės įtampos [1]. Yue Cao ir kt. nagrinėjamas žmogaus ir roboto bendradarbiavimo (*HRC*, angl. *human-robot collaborative*) taikymas surinkimo, bei suvirinimo procese. Autoriai pabrėžia, kad tokios sistemos tampa vis aktualesnės dėl augančio gamybos sudėtingumo ir poreikio didinti efektyvumą bei kokybę. Tyrimai rodo, kad *HRC* leidžia sumažinti klaidų tikimybę rankiniuose procesuose, nes robotai užtikrina didesnę tikslumą ir pastovumą, o žmonės pasižymi lankstumu ir gebėjimu spręsti nestandartines situacijas. Taip pat pastebėta, kad robotai gali sumažinti darbuotojų fizinę krūvį, nuovargį ir psichologinę įtampą. Svarbi tyrimų kryptis yra saugos užtikrinimas ir intuityvių sąsajų kūrimas, kad bendradarbiavimas su robotais būtų sklandus ir priimtinas operatoriams. Galiausiai pabrėžiama, kad žmogaus ir roboto bendradarbiavimas yra viena perspektyviausių technologijų tolesniam gamybos procesų tobulinimui [2]. Kitame darbe [3] autoriai nagrinėja pažangias robotizuotas surinkimo technologijas. Autoriai

rezultatuose išskiria keturias pagrindines kryptis: detalių, bei jų pozicijos aptikimas ir ieškojimas, tikslių roboto judesių strategijas, klaidų aptikimą, bei našumo vertinimą. Autoriai pabrėžia, kad detalių trajektorijai, pozicijai nustatyti dažniausiai taikoma kompiuterinė rega ar trajektorijos metodai, tačiau regos tikslumas vis dar ribotas, todėl naudojami kompensaciniai sprendimai. Tikslių roboto judesių strategijų srityje tradiciniai metodai yra tinkami tik tam tinkamoje aplinkoje, o didesnę lankstumą suteikia mokymusi grįstos technologijos, kurios geba greitai prisitaikyti prie naujų situacijų, tačiau realioje gamyboje dar stokojama jų patikimumo. Klaidų aptikimo faktorius laikomas būtinu saugios ir kokybiškos gamybos dalimi, tačiau dabartiniai sprendimai yra riboti, todėl būtina tobulinti sistemą. Našumo vertinimas apskaičiuojamas pagal surinkimo laiką, sėkmės rodiklį, įstatymo jėgą, bei mokymosi efektyvumą. Autoriai nustatė, kad stiprinamuoju mokymusi (RL) grįsti metodai pasiekia panašią surinkimo kokybę kaip ir klasikiniai metodai, tačiau užtikrina greitesnį mokymosi procesą ir geresnį išpildymą, todėl turi didelį praktinį taikymo potencialą [3].

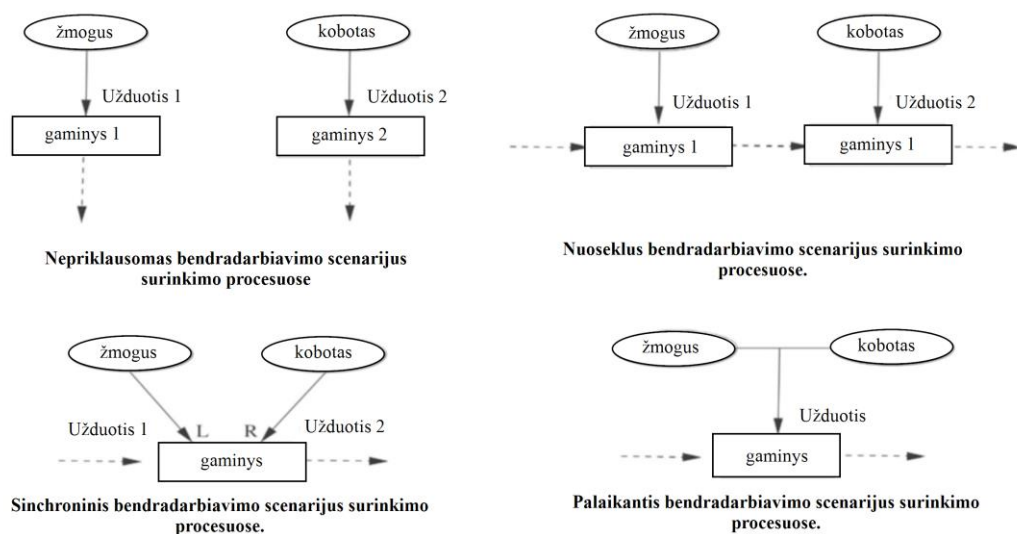
Vienas iš surinkimo procesuose naudojamų įrankių yra kobotas, ar kitaip, bendradarbiaujantis robotas. Vienaame straipsnyje atskleidžiama, kad kobotų populiarumas gamyboje didėja [4]. Vis didėjantis automatizacijos panaudojimas gamyboje, leidžia sparčiai tobulinti robotų panaudojimą gamyboje. Vis diegiamos saugios robotų alternatyvos, kurios leidžia žmogui dirbti kartu su robotu ir jis įvardijamas bendradarbiaujančiu robotu, kobotu. Išskiriami koboto skirtumai tokie, kad šis procesus daro lėčiau, nei robotas, todėl žmogui yra saugiau dirbti šalia jo, taip pat kobotas yra lengviau programuojamas ir lengviau su juo dirbti išvien [4]. Literatūroje išskiriami skirtingi žmogaus ir kobotų bendradarbiavimo tipai (žr. 1 pav.), kurie priklauso nuo to, kaip jie kartu atlieka užduotis darbo vietoje [4]:

Nepriklausomas (*Independent/Parallel*) – žmogus ir kobotas atlieka skirtingas užduotis ant skirtingų detalių, dirbama lygiagrečiai, be tiesioginės sąveikos.

Nuoseklus (*Sequential*) – žmogus ir kobotas atlieka skirtingas užduotis tam pačiam gaminiui iš eilės, pvz., kobotas perduoda detalę, žmogus atlieka kitą veiksmą.

Sinchroninis (*Simultaneous*) – žmogus ir kobotas vienu metu atlieka skirtingas užduotis tam pačiam gaminiui. Dažnai darbas atliekamas vienas šalia kito, reikalingas didelis saugos užtikrintumas.

Palaikantis (*Supportive*) – žmogus ir kobotas kartu dirba prie vienos užduoties, pvz., kobotas laiko detalę, o žmogus ją tvirtina.



1 pav. Bendradarbiaujančių robotų ir žmogaus darbo tipų schemas [4]

Pastebimi ir teigiami robotų integravimo niuansai ekonomikoje. Literatūros apžvalgoje, pagal statistinius duomenis, mokslininkai nustatė, kad kobotų pardavimai vis didėja, 2021 metais kobotai rinkoje siekė 700 milijonų Amerikos dolerių ir pranašaujama, kad 2030 metais išaugs iki dviejų bilijonų Amerikos dolerių [4]. Kitas šaltinis įrodo greitą robotizuotos sistemos panaudojimo atsipirkimo laiką. Surinkinėjant modulines namų sistemas ir jas automatizavus, pasitelkiant robotus, apskaičiuota, kad ši atsipirktų per pusę metų [5].

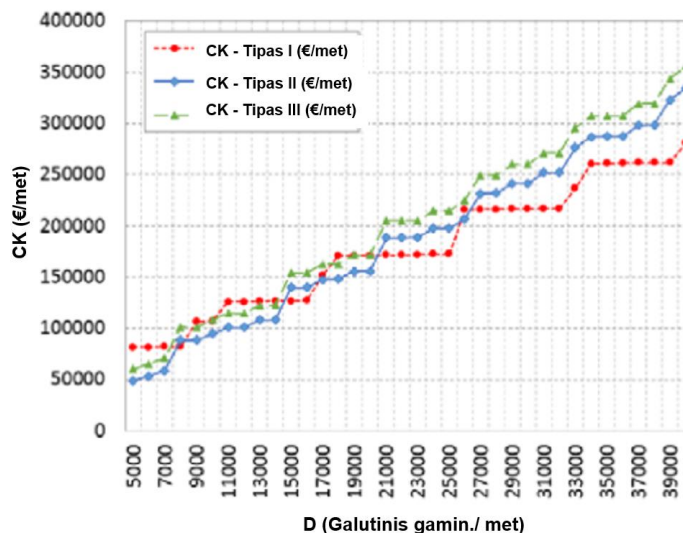
Viename iš naujausių tyrimų tyrėjai atskleidžia, kad gamybos procesų kontrolė ir robotiniai sprendimai jau turi bendrą sąsają ir juos galima suderinti ir gauti naudingą, puikiai funkcionuojančią sistemą, užtikrinant gamybos procesų kokybę [6]. Pasitelkus robotus, galima pasiekti gerus rezultatus, atliekant vizualinę inspekciją, detalių padėties nustatymą, nustatyti neatitikimus ir visus duomenis užfiksavus surinkti visą informaciją į duomenų bylas. Pavyzdžiui, viename tyrime buvo atliekami roboto įrankių trajektorijos nukrypimų analizė, pritaikant baigtinių elementų analizę, lakštų formavimo užduotyje ir nustatyta, kad roboto padėties tikslumas padidėjo 80 procentų [6]. Kitame darbe buvo pasiūlytas kelių robotų trajektorijų optimizavimo modelis, kuris leido sumažinti detalių deformacijas 12 procentų neilginant ciklo laiko [7]. Toks būdas turi įtakos klasikiniams pokyčiams, kokybę tikrinti proceso pabaigoje, pakeisti į realiu laiku vykstantį, kiekvieno žingsnio stebėjimo procesą ir taip išvengti kokybinių klaidų procesuose [6].

Kitas svarbus aspektas – *DI* ir skaitmeninių dvynių (angl. *digital twins*) panaudojimas. Tyrime [7] nagrinėjama, kaip duomenys, sugeneruoti virtualioje gamyklos aplinkoje, gali būti naudojami dirbtinio intelekto tinklams treniruoti, siekiant aptikti gamybos proceso klaidas. Toks metodas leidžia kurti iš anksto gamybos procesų skaitmeninius vizualius variantus, dar prieš realių sistemų paleidimą, taip sumažinant eksperimentavimo, testavimo kaštus ir užtikrinant greitesnį diegimą [7]. Be to, skaitmeniniai dvyniai suteikia galimybę ne tik imituoti surinkimo procesus, bet ir prognozuoti, kuriose vietose gali atsirasti klaidos, taip dar labiau sustiprinant kontrolės vaidmenį procesuose [7].

Naujausi tyrimai rodo, kad tokie dirbtinio intelekto ir skaitmeninių dvynių panaudojimo sprendimai gali būti taikomi ir priežiūrai, nustatant galimas problemas dar prieš jų atsiradimą. Pavyzdžiui, skaitmeninis dvynys buvo pritaikytas pramoninio roboto veikimo laikui apskaičiuoti, užtikrinant įrangos patikimumą [6]. Tuo tarpu kitas mokslininkas pasiūlė modelį, kur, panaudojus *CycleGAN* metodą, padidino roboto jungčių gedimų diagnostikos tikslumą nuo 32,5 % iki net 98,86 %, reikalaudamas ženkliai mažesnio duomenų kiekio [6]. Kitas pavyzdys kuriame kelių jutiklių pagrindu sukurtas skaitmeninis dvynys leido sukurti virtualų 96 % tikslumo kokybės žemėlapi, leidusį aptikti defektų vietas ir jas pašalinti robotu, be žmogaus įsikišimo [6]. Šie pavyzdžiai rodo, kad skaitmeninių dvynių integracija į gamybą suteikia ne tik imitavimo ar mokymo pranašumų, bet ir leidžia realiuoju laiku diagnozuoti klaidas, prognozuoti įrangos būklę, bei automatizuoti defektų šalinimą [6][7]. Tai iš esmės keičia tradicinį kokybės kontrolės modelį.

Viename tyrime mokslininkai tyrė ekonominį trijų tipų detalių komplektavimo sistemų atsiperkamumą. Pirmo tipo sistema, tai kurioje detalės paėmimas ir padėjimas yra automatizuotas, naudojant automatinę sistemą, o komplektavimas vykdomas rankiniu būdu. Antras tipas, kai paėmimas ir surinkimas yra atliekamas rankiniu būdu. Trečia tipo sistema, tokia pat kaip ir antra, bet yra įdiegta papildoma detalių atpažinimo sistema, kuri leidžia išvengti klaidų. Rezultatai rodo tai, kad esant mažoms gamybos apimtims ekonomiškesnės yra rankinės sistemos, antro ir trečio tipo sistemos, nes nereikalauja didelių pradinių investicijų. Tačiau pastebima iš rezultatų (žr. 2 pav.), kad padidėjus komplektuojamų detalių skaičiui, maždaug ties 25 tūkstančiais vienetų, automatizuota, pirmo tipo

sistema, tampa ekonomiškai pranašesnė. Pastebėta ir tai, kad trečio tipo, su papildomu klaidų prevencijos moduliu, sistema niekaip nepasiekia antro tipo be papildomos prevencijos, tokios klaidų prevencijos sistemos diegimas padidina kaštus ir niekaip nebeatsveria technologinio modulio diegimo investicijų. Nors ir rankinės sistemos vis dar plačiai taikomos, bet matoma, kad automatizuotos sistemos pasiteisina tik esant dideliems, šiuo atveju nuo 25 tūkstančių vienetų, gamybos kiekiams [8].



2 pav. Metinis detalių komplektavimo kaštų palyginimas pagal sistemos tipą, nuo gamybos vienetų skaičiaus [8]

Šiuolaikinėje pramonėje gamybos efektyvumas, kokybė ir procesų patikimumas tampa esminiais konkurencingumo veiksniais, todėl įmonės vis dažniau diegia automatizuotas ir pažangias tikrinimo bei surinkimo sistemas, siekdamos sumažinti žmogaus klaidų tikimybę ir užtikrinti ergonomiškas darbo sąlygas. Naujausi moksliniai tyrimai rodo, kad žmogaus ir roboto bendradarbiavimas (*HRC*) leidžia sumažinti klaidų skaičių, fizinį krūvį bei psichologinę įtampą darbuotojams, o kartu didina gamybos lankstumą ir kokybę. Tobulėjant robotizuotoms surinkimo technologijoms, vis dažniau taikomi mokymusi grįsti metodai, užtikrinantys greitesnį prisitaikymą prie naujų situacijų ir didesnę surinkimo tikslumą. Kartu augantis kobotų (bendradarbiaujančių robotų) populiarumas įrodo, kad saugus ir intuityvus žmogaus–roboto darbas tampa neatsiejama modernios gamybos dalimi. Ekonominiai tyrimai patvirtina spartų šių technologijų atsipirkimą – kai kuriais atvejais investicijos atsiperka vos per kelis mėnesius, o globali kobotų rinka prognozuojamai augs iki dviejų bilijonų dolerių 2030 m. Integruojant dirbtinį intelektą ir skaitmeninius dvynius, gamybos procesų kontrolė pasiekia naują lygmenį – leidžia ne tik imituoti ir prognozuoti klaidas, bet ir realiuoju laiku atlikti diagnostiką bei automatizuotai šalinti defektus, keičiant tradicinį kokybės kontrolės modelį į nuolatinio stebėjimo sistemą. Galiausiai, tyrimai rodo, kad nors rankinės sistemos išlieka ekonomiškos mažos apimtys gamyboje, didėjant gamybos mastui automatizuoti sprendimai tampa finansiškai pranašesni ir būtini siekiant ilgalaikio efektyvumo bei kokybės užtikrinimo.

1.2. *Poka-Yoke* ir 5S principai gamyboje

Mokslinėje literatūroje vis dažniau nagrinėjamas *Poka-Yoke* principų derinimas su *Pick-to-Light* sistemomis, kaip efektyvi priemonė klaidoms eliminuoti. Mokslininkai atliko tyrimą, kuris parodė, kad šių metodų integracija gali ženkliai pagerinti gamybos efektyvumą ir kokybę [9]. Autoriai išskiria du jutiklių tipus, taikomus *Poka-Yoke* sistemose: kontaktinius, kurie aptinka netinkamą detalės padėtį

ar formą, naudojant kontaktą ar magnetinį lauką, bei nekontaktinius, veikiančius šviesos spindulio perėjimo arba atspindžio principu. Jutiklių panaudojimas leidžia lanksčiai užtikrinti klaidų prevenciją diegiant automatizuotas sistemas [9].

Pick-to-Light sistema, paremta optiniais signalais, darbuotoją realiuoju laiku nukreipia tinkama seka: paėmus detalę, užsidega kitas indikatorius. Netinkamo veiksmo atveju sistema įspėja šviesos ar garsiniu signalu. Tyrime pabrėžiama, kad ši technologija padidina našumą, užtikrina kokybę, sumažina klaidų tikimybę iki nulio, supaprastina naujų darbuotojų mokymą [9]. Pasak Prabowo ir Aisyah, *Poka-Yoke* metodas leidžia žymiai sumažinti žmogiškųjų klaidų tikimybę gamybos procese, o tai tiesiogiai mažina atliekų kiekį, broko procentą ir bendras gamybos sąnaudas. Autoriai pabrėžia, kad tinkamai integruotos prevencinės priemonės gali sumažinti riziką daugiau nei 55 %, taip gerinant saugą ir procesų patikimumą [10].

Rezultatų analizė parodė, kad diegiant *Pick-to-Light* kartu su *Poka Yoke* pasiektas surinkimo laiko sumažinimas. Pavyzdžiui, komponentų paruošimo operacija sutrumpėjo nuo 24,7 iki 22,63 sekundžių, o mokymo operacijos laikas – nuo 11,16 iki 8,8 sekundžių. Didžiausias efektyvumas pastebėtas detalės surinkimo metu: procedūros atlikimo laikas sumažėjo daugiau kaip 50 %, nes sistema aiškiai nurodė kitus žingsnius. Bendras vienos detalės surinkimo laikas sutrumpėjo apie 11%. Dar didesnė nauda gauta serijinės gamybos metu – surinkant 10 vienetų, bendras laikas sumažėjo beveik 20%. Tokie rezultatai įrodo praktinę sistemos naudą, nes ji leidžia paspartinti gamybą ir kartu sumažinti klaidų tikimybę [9].

Panašų poveikį pabrėžia ir kiti autoriai – atlikus *Poka-Yoke* sprendimo diegimą medžiagų paruošimo procese, *FMEA* rodikliai pagerėjo: *RPN* sumažėjo apie 192 %, o defektų lygis pasiekė 0 PPM, nes visi veiksmai buvo atlikti naudojant *Poka-Yoke* metodą [11].

Kitame šaltinyje galima pastebėti, kaip *Poka Yoke* principą galima iš mechaninio sprendimo perdaryti į visiškai dirbtinio intelekto valdomą sprendimą. Moksliniame darbe mokslininkai tyrė ir aprašė tokią sistemą, kurioje vaizdiniai duomenys yra realiu laiku dirbtinio intelekto analizuojami ir iš skaičiavimų nustatoma ar detalėje visi komponentai yra tinkamai surinkti. Rezultatai parodė, kad tokia technologija pasižymi dideliu tikslumu ir leidžia efektyviai šalinti smulkius defektus, kuriuos kitais metodais būtų sunku identifikuoti. Taip pat, tokia sistema, paremta dirbtinio intelekto, leidžia gamybos metu prisitaikyti prie besikeičiančių gamybos sąlygų [12].

Tyrime analizuojamas 5S metodikos įgyvendinimas metalo detalių gamybos įmonėje, kuri orientuota į automobilių pramonę. Įgyvendinimas buvo atliktas atsižvelgiant į visus 5S žingsnius – rūšiavimą, išdėstymą, valymą, standartizavimą ir palaikymą. Pirmiausia iš darbo vietos pašalintos nereikalingos priemonės ir medžiagos, pertekliniai įrankiai pažymėti, o likusieji išdėstyti pagal naudojimo dažnumą. Buvo perplanuotas dirbtuvių išdėstymas ir sukurtas naujas smulkių detalių sandėlis, tai leido atlaisvinti apie 35 kvadratinis metrus darbo vietos ir dar 28 kvadratinis metrus papildomos erdvės sandėliavimui [13].

Atliekant laiko matavimus prieš ir po 5S įdiegimo, nustatyta, kad medžiagų paėmimo trukmė sutrumpėjo daugiau nei 70 %, o bendras dažniausiai atliekamų užduočių laikas sumažėjo 31 minučių. Apskaičiuota, kad kiekvienas darbuotojas per dieną sutaupo apie 2 val. 8 min., o tai sudaro daugiau nei 1200 € per mėnesį sutaupytų kaštų. Įdiegimo išlaidos siekė 4599 €, todėl projektas atsipirko per pusę metų. Autoriai pažymi, kad 5S įdiegimas ne tik padidino darbo greitį, bet ir pagerino saugą,

ergonomiką bei darbuotojų pasitenkinimą, o aiškiai pažymėtos darbo vietos ir įrankiai leido išvengti nereikalingų veiksmų bei sutrumpinti paieškos laiką [13].

Į panašų efektyvumo pagerėjimą dėmesį atkreipia ir Monnanyana bei Gupta (2021) atliktas tyrimas [14], kuriame 5S metodika buvo diegiama vožtuvų gamybos įmonėje Pietų Afrikoje. Autoriai nurodo, kad prieš įgyvendinimą darbo vietose vyravo netvarka ir neefektyvus įrankių paskirstymas – operatoriai gaišo laiką ieškodami įrankių ar net skolindamiesi juos iš kitų darbuotojų. Po 5S įdiegimo situacija ženkliai pagerėjo: vidutinis įrankių paieškos laikas sutrumpėjo kelis kartus – pavyzdžiui, sriegiklio paieška sumažėjo nuo 19,6 iki 1,8 minutės, o grąžto – nuo 5,5 iki 2,2 minutės. Audito rezultatai taip pat parodė didelį 5S žingsnių įvertinimo augimą – nuo vos 5–15 % iki 70–95%, o darbo vietos tapo švaresnės, labiau standartizuotos ir aiškiai pažymėtos. Autoriai pabrėžia, kad 5S diegimas ne tik padidino produktyvumą ir sumažino prastovas, bet ir suformavo nuolatinio tobulinimo, bei tvarkos palaikymo kultūrą [14].

1.3. Rizikos analizė ir *FMEA* taikymas gamyboje

Lean ir *Six Sigma* metodikos paprastai taikomos kartu, nes jų derinys padeda ne tik sumažinti proceso variacijas, bet ir pašalinti nereikalingas veiklas. Tiriamas šaltinis parodo, kad tokiais atvejais *FMEA* tampa naudingu įrankiu, ypač kai procesas neturi ankstesnių matavimo duomenų. *FMEA* padeda sistemingai įvertinti gedimų priežastis, apskaičiuoti jų riziką ir nustatyti, kurios problemos daro didžiausią poveikį prastos kokybės kaštams (*COPQ*). Tokiu būdu galima tiksliai suplanuoti korekcines priemones ir sumažinti nuostolius. Autoriai pabrėžia, kad integruojant *FMEA* su *Lean Six Sigma* priemonėmis kokybės gerinimas vyksta greičiau, mažesniais kaštais [15].

FMEA metodas šaltinyje pristatomas, kaip vienas veiksmingiausių rizikos analizės įrankių, naudojamų įvairiose pramonės srityse. Autoriai pabrėžia, kad sudėtingose sistemose žmogaus klaidos yra neišvengiamos, todėl būtina analizuoti ne tik jau įvykusius incidentus, bet ir potencialias proceso silpnybes dar prieš joms pasireiškiant. Būtent tokį principą taiko *FMEA* – metodiškai išskaido procesą į žingsnius ir įvertina, kokiais būdais kiekvienas jų gali sugesti bei kokį poveikį gedimas turėtų visai sistemai [16].

Straipsnyje akcentuojama, kad *FMEA* pagrindas yra rizikos prioriteto skaičius (*RPN*), apskaičiuojamas pagal gedimo sunkumą, pasikartojimo tikimybę ir aptikimo galimybę. Tai leidžia aiškiai išskirti pavojingiausius taškus ir suplanuoti tikslias prevencines priemones. Autoriai taip pat nurodo, kad yra dvi *FMEA* rūšys – dizaino (*DFMEA*) ir procesų (*PFMEA*) – ir jos plačiai taikomos gamybos, aviacijos bei inžinerijos srityse [16].

Šaltinyje pateikiamas praktinis pavyzdys parodo, kad nuosekli *FMEA* analizė leidžia greitai identifikuoti didelį skaičių galimų gedimų ir jų priežasčių, o vėliau – įdiegti realius proceso patobulinimus (pvz., darbo vietos pertvarkymą ar ženklavimo pakeitimus). Autoriai apibendrina, kad *FMEA* yra paprastas, lengvai pritaikomas ir efektyvus metodas, padedantis sumažinti gedimų tikimybę bei padidinti bet kurios sudėtingos sistemos patikimumą [16].

Ervural su bendraautoriumi pristato patobulintą, visiškai duomenimis grįstą *FMEA* metodą, kuriuo siekiama išvengti tradicinio *FMEA* subjektyvios nuomonės trūkumo. Vietoje to siūloma naudoti iš realios gedimų istorijos apskaičiuojamus rizikos rezultatus: gedimų dažnį, produktų nuostolius, laiko

nuostolius ir gedimų nestabilumą. Tokie veiksniai leidžia tiksliau įvertinti gedimų poveikį, nes jie tiesiogiai atspindi faktinius praradimus ir gedimų elgseną. Rizikos veiksniai nustatomi taikant *M-CRITIC* metodą, o gedimų režimai prioretizuojami naudojant *ABAC* metodą [17]. Metodika išbandyta maisto pramonės gamykloje, analizuojant vienerių metų gedimų duomenis. Gauti rezultatai parodė, kad pasiūlytas modelis patikimai išskiria kritiškiausius gedimus ir išlieka stabilus net atliekant jautrumo analizę, bei keičiant rizikos veiksnių svorius. Tai patvirtina, kad duomenimis paremta *FMEA* versija yra tikslesnė ir atsparesnė, nei tradicinis *RPN*, o pats metodas leidžia objektyviai ir nuosekliai identifikuoti procesų problemas [17].

Tyrimuose vis dažniau akcentuojama, kad *FMEA* metodas tobulinamas įtraukiant realaus laiko eksploatacinius duomenis. Pavyzdžiui, naujesni autoriai siūlo dinaminę *CNC* įrangai taikomą *FMEA* versiją, kurioje gedimų rizika vertinama ne tik ekspertų nuomone, bet ir remiantis faktiniais įrenginio veikimo bei priežiūros duomenimis. Tokia metodika leidžia nuolat atnaujinti *RPN* reikšmes ir tiksliau prognozuoti gedimus, nes rizika analizuojama pagal realiai kintančią įrangos būklę, o ne vien statinę tradicinę *FMEA* analizę [18].

Remiantis literatūros šaltiniais pastebima, kad tradicinė *FMEA* metodika turi ribotumą dėl subjektyvių S–O–D vertinimų ir vienodų rizikos veiksnių svorių, todėl šiuolaikiniuose tyrimuose ji papildoma duomenų apdorojimo ir keliais kriterijais grįstais sprendimo metodais, kurie padeda tiksliau prioretizuoti rizikas [19]. Tuo tarpu naujesni tyrimai akcentuoja *FMEA* taikymo plėtrą už techninių gedimų ribų – metodas naudojamas vertinti ir tvarumo bei aplinkosauginius rizikos veiksnius gamybos sistemose [20]. Abi kryptys parodo, kad *FMEA* evoliucionuoja į integruotą, platesnio masto rizikos vertinimo įrankį, tinkantį sudėtingoms šiuolaikinėms gamybos aplinkoms [19].

1 lentelė. Sistemos *FMEA* rimtumo gairės (1-10 kokybinė skalė) [21]

Poveikio lygis	Įvertinimas	Kriterijai
Nėra	1	Jokio poveikio.
Labai menkas	2	Klientas nesusierzinęs. Labai nedidelis poveikis produkto ar sistemos veikimui.
Nedidelis	3	Klientas šiek tiek susierzinęs. Nedidelis poveikis produkto ar sistemos veikimui.
Mažas	4	Klientas patiria nežymų nepatogumą. Mažas poveikis produktui ar sistemos veikimui.
Vidutinis	5	Klientas patiria tam tikrą nepasitenkinimą. Vidutinis poveikis produktui ar sistemos veikimui.
Ženklus	6	Klientas jaučia diskomfortą. Produkto veikimas suprastėjęs, tačiau sistema vis dar veikia ir yra saugi. Iš dalies veikimo sutrikimas.
Didelis	7	Klientas nepatenkintas. Produkto veikimas stipriai pablogėjęs, bet vis dar funkcionalus ir saugus. Sistema apribota.
Labai didelis (ekstremalus)	8	Klientas labai nepatenkintas. Produktas neveikia tinkamai, nors sistema išlieka saugi. Sistema neveikianti.
Sunkus	9	Potencialiai pavojingas poveikis. Produktą galima sustabdyti be nelaimės, tačiau gresia laikinas gedimas arba neatitikimas teisės aktų reikalavimams.
Pavojingas	10	Pavojingas poveikis – su sauga susijęs staigus gedimas. Neatitikimas vyriausybiniams reikalavimams.

1.4. 3D spausdinimo taikymas gamybos įmonėse

Pasak Jadhav ir bendraautorių (2022), 3D spausdinimas, dar vadinamas pridėtine gamyba (angl. *Additive Manufacturing*), yra technologija, kai objektai formuojami sluoksniu po sluoksnio iš įvairių medžiagų, naudojant skaitmeninį 3D modelį. Šiuo metu pramonėje plačiai taikomi keli pagrindiniai metodai, tokie kaip *FDM (Fused Deposition Modelling)*, kai lydomas termoplastinis siūlas sluoksniuojamas iki kieto objekto formos, *SLS (Selective Laser Sintering)*, kai milteliai lydomi lazeriu, ir *SLA (Stereolithography)*, kai objektas formuojamas iš dervos, kietinamos lazeriu. Autoriai nurodo, kad šiuolaikiniai 3D spausdintuvai naudoja platų medžiagų spektrą – nuo polimerų ir kompozitų iki metalų ir keramikos, todėl technologija pritaikoma įvairiose srityse, įskaitant mediciną, architektūrą, mokslą, bei švietimą [22]. Tyrimai rodo, kad metalų pridėtinė gamyba leidžia kurti sudėtingas titano, aliuminio ar nerūdijančio plieno detales, tačiau pagamintos detalės dar nėra tinkamos naudoti praktikoje, todėl technologijai būtina tolimesnė plėtra [23]. Medicinos srityje 3D spausdinimo technologija leidžia gaminti individualizuotus protezus ir anatominius modelius, architektūroje – greitai kurti fizinius pastatų maketus, o mokyklose ir universitetuose – skatinti kūrybišką mokymąsi ir inžinerinį mąstymą [22]. Pasak autorių, Singh ir Jain (2024), medicinos srityje 3D spausdinimas naudojamas ne tik implantams ar medicinškai pritaikytiems prietaisams gaminti, bet ir chirurginiam planavimui — gydytojai pagal žmogaus skanavimo duomenis išspausdina tikslų paciento anatomijos modelį, kuris leidžia sumažinti operacijos trukmę ir pagerinti gydymo rezultatus [24]. 3D spausdinimas taip pat naudojamas rinkodaroje ir produktų kūrimo etapuose, kai reikia greitai sukurti realius prototipus ar maketus, padedančius geriau perteikti idėjas bei įvertinti gaminio formą ir funkcionalumą [22].

3D spausdinimas šiandien tampa viena iš svarbiausių technologijų, leidžiančių gamybos įmonėms kurti detales ir įrangą daug greičiau, bei lanksčiau, nei naudojant tradicinius metodus [25]. Naujausiuose tyrimuose pabrėžiama, kad ši technologija vis dažniau naudojama įvairių pagalbinių gamybos priemonių, tvirtinimo įrenginių, įrengimo elementų ir prototipų gamybai tiesiog įmonės viduje, taip sumažinant tiekimo laiką ir kaštus (JENA, MISHRA, MOHARANA, 2024). 3D spausdinimas išsiskiria tuo, kad suteikia gerokai daugiau laisvės formuoti gaminius sudėtingos geometrijos, įvairiais masteliais, todėl tampa įmanoma kurti konstrukcijas pritaikytas optimaliam stiprumui ir funkcionalumui [26]. Autoriai pažymi, kad pridėtinė gamyba suteikia galimybę išvengti ilgo gamybos paruošimo – įmonė gali pati pasigaminti reikiamas dalis pagal skaitmeninį modelį per kelias valandas, o tai ypač svarbu, kai įrangos pritaikymas keičiasi priklausomai nuo gaminio tipo [25].

Kitame šaltinyje pabrėžiama, kad 3D spausdinimo integracija į gamybos sistemas prisideda ne tik prie procesų greičio, bet ir prie tvarumo, bei efektyvesnio išteklių naudojimo. Pasak Muth (2023), pramonėje ši technologija leidžia kurti funkcionalius komponentus iš mažesnio kiekio žaliavų, todėl mažėja atliekų kiekis ir energijos sąnaudos. Tai leidžia įmonėms gaminti individualizuotus įrankius ar detales mažomis partijomis, išvengiant naudoti brangios liejimo ar frezavimo įrangos. Tokiu būdu 3D spausdinimas tampa ne tik prototipų kūrimo priemone, bet ir realia serijinės gamybos proceso dalimi, ypač kai kalbama apie įrenginių modifikacijas ar testines detales [27]. Taip pat, literatūroje pabrėžiama, kad 3D spausdinimas gali tapti žiedinės ekonomikos dalimi – plastiko atliekos perdirbamos į spausdinimo medžiagą, o pats pridedamasis gamybos procesas leidžia ženkliai sumažinti gamybos atliekų kiekį [28].

Benas Saidas (2025) pabrėžia, kad šiuolaikinė pramonė vis dažniau taiko hibridinius gamybos modelius, kai tradiciniai apdirbimo būdai derinami su 3D spausdinimo būdu. Tokiu būdu sukuriama itin tikslių ir stiprūs komponentai, o 3D spausdinimu pagamintos detalės naudojamos kaip laikikliai, jungtys ar įtaisai įvairiems surinkimo procesams. Tokia kombinacija leidžia užtikrinti greitą įrangos pritaikymą gamybos linijose ir klaidų eliminavimą, nes kiekvienas elementas gali būti pritaikytas konkrečiai operacijai [29].

Naujesni autorių tyrimai atkreipia dėmesį, kad kartu su 3D spausdinimo plėtra būtina vertinti ir šio proceso rizikas. Straipsnyje nagrinėjama *FDM* technologija, kuri plačiai naudojama pramonėje ir buityje, tačiau jos poveikis darbuotojų sveikatai vis dar nėra iki galo įvertintas. Autoriai rizikos vertinimui taiko *Kinney* metodą ir nuosekliai analizuoja galimas mechanines, termines ir chemines grėsmes – nuo įpjovimų ir nudegimų iki pavojingų dalelių bei lakiųjų organinių junginių, išsiskiriančių lydant *ABS* ir *PLA* medžiagas. Apskaičiuoti rizikos veiksniai parodė, kad didžiausia rizika siejama būtent su cheminiais veiksniais, todėl rekomenduojama 3D spausdintuvus naudoti uždaroje kameroje, gerai vėdinamoje patalpoje, rinktis kuo žemesnę spausdinimo temperatūrą ir naudoti asmenines apsaugos priemones [30].

1.5. Skyriaus apibendrinimas

Teorinė analizė parodė, kad šiuolaikinėje pramonėje surinkimo procesai vis labiau krypsta į pusiau automatizuotus ir automatizuotus sprendimus, kuriuose žmogaus darbas derinamas su robotais, jutikliais ir išmaniosiomis valdymo sistemomis. Mokslinėje literatūroje akcentuojama, kad žmogaus ir roboto bendradarbiavimas, kobotų panaudojimas, dirbtinis intelektas ir skaitmeniniai dvyniai leidžia ne tik sumažinti fizinį krūvį bei nuovargį, bet ir padidinti surinkimo tikslumą, stabilumą ir kokybę. Tačiau kartu pabrėžiama, kad visiškai automatizuotos sistemos ekonomiškai pasiteisina tik esant didesniems gamybos kiekiams, todėl pusiau automatizuoti sprendimai, kuriuose žmogus atlieka dalį funkcijų, o sistema užtikrina kontrolę ir klaidų prevenciją, išlieka aktualūs mažesnės apimties gamyboje.

Nagrinėti *Lean*, *5S*, *Poka-Yoke* ir *Six Sigma* metodai parodė, kad kokybiškam surinkimui neužtenka vien tik greitai veikiančios įrangos – būtina aiški, žingsninė, logiškai struktūruota sistema, kurioje kiekviena detalė turi savo vietą, o operatoriaus veiksmai yra maksimaliai supaprastinti. *5S* principai užtikrina tvarkingą ir standartizuotą darbo vietą, kur komponentai ir įrankiai išdėstyti pagal naudojimo dažnį ir aiškiai pažymėti. Analizuoti duomenimis paremti ir dinaminiai *FMEA* variantai rodo, kad rizikos vertinimas gali būti nuolat atnaujinamas pagal realius proceso duomenis, o tai ypač svarbu pusiau automatizuotoms sistemoms, kur žmogaus faktorius dar išlieka reikšmingas.

Poka-Yoke principai literatūroje išryškėjo kaip vienas svarbiausių klaidų prevencijos įrankių, ypač surinkimo procesuose. Tyrimai rodo, kad derinant *Poka-Yoke* su *Pick-to-Light* sistemomis ir jutikliais galima praktiškai eliminuoti žmogiškas klaidas, sutrumpinti surinkimo laiką ir ženkliai sumažinti *RPN*, bei defektų lygį. Tai tiesiogiai siejasi su projektuojama sistema, kurioje *Poka-Yoke* logika bus integruojama į fizinius objektus ir darbo eigą: detalės turės aiškius lizdus, montavimo seka bus žingsninė, o neteisingas komponento įdėjimas arba praleistas žingsnis taps fiziškai ar logiškai neįmanomas. Taip *Poka-Yoke* tampa ne atskiru teoriniu principu, o pagrindine projektuojamos sistemos dalimi.

Kita svarbi teorinės dalies kryptis – 3D spausdinimo technologijų pritaikymas gamyboje. Moksliniai šaltiniai atskleidžia, kad 3D spausdinimas, ypač *FDM*, yra pigus, pakankamai paprastas ir labai lankstus būdas kurti prototipus, pagalbinius įrenginius, ir specializuotus laikiklius tiesiog įmonės viduje. Tai leidžia greitai pritaikyti įrangą konkrečiam gaminiui ar operacijai ir kurti individualizuotus *Poka-Yoke* sprendimus, kurie būtų sunkiai ar brangiai įgyvendinami tradicinėmis technologijomis.

Teorinė analizė parodė, kad pusiau automatizuotas surinkimas turi būti paremtas tvarkinga, žingsnine ir aiškiai standartizuota sistema. *Lean*, *5S* ir *FMEA* padeda įsivertinti rizikas ir susitvarkyti procesą, o *Poka-Yoke* ir 3D spausdintomis detalėmis grįsta įranga realiai neleidžia operatoriui suklysti. Tai patvirtina darbo hipotezę, kad automatizuotos tikrinimo priemonės gali sumažinti rankinio darbo klaidas ir užtikrinti stabilesnę kokybę.

Toliau darbe bus pereinama prie praktinės situacijos analizės – bus aprašyta, kaip surinkimo ir tikrinimo procesas vykdomas prieš įrangos diegimą, kokios problemos ir klaidos pasitaiko rankinio surinkimo metu, bei kokios konkrečios prielaidos lėmė poreikį kurti ir diegti pusiau automatizuotą *Poka-Yoke* principais paremtą surinkimo sistemą.

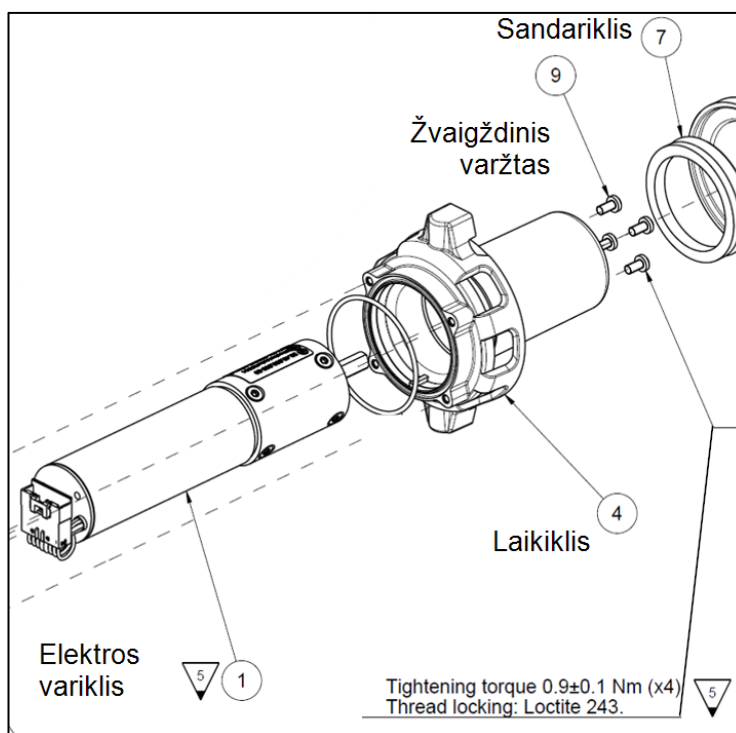
2. Situacijos prieš pokyčius analizė

Šiame skyriuje analizuojama esama padėtis prieš įgyvendinant pusiau automatizuotos kontrolės įrangos sprendimą. Pirmiausia apžvelgiamas rankinio surinkimo procesas, nustatomi pagrindiniai darbo etapai, potencialūs žmogiškieji klaidų šaltiniai, bei įvertinamos jų pasekmės. Siekiama pagrįsti poreikį procesą modernizuoti ir įdiegti automatizuotus kontrolės elementus, siekiant užtikrinti kokybę bei sumažinti defektų riziką.

2.1. Rankinio surinkimo procesas

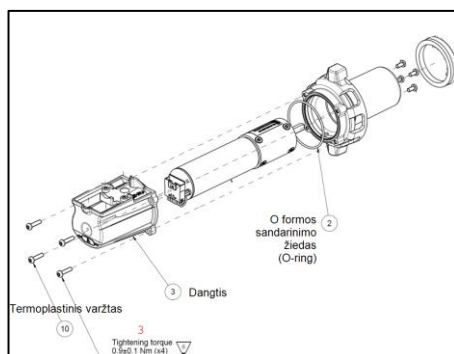
Analizuojant esamą rankinio surinkimo procesą, buvo išnagrinėta detalių surinkimo seka pagal gaminio surinkimo brėžinį (žr. 6 pav.). Rankiniu būdu surinkimas buvo atliekamas trimis etapais, kiekviename iš jų naudojant skirtingas detales ir atliekant skirtingas operacijas. Surinkimo eiga ir pozicijų išdėstymas buvo pagrindas tolesniam pusiau automatizuotos įrangos projektavimui.

Pirmu etapu surenkamos keturių pozicijų detalės, kurios yra – viena iš pagrindinių detalių tai elektros variklis, pozicija 1, ant jo dedama plastikinė detalė laikiklis, pozicija 4, laikiklis prisukamas prie variklio žvaigždinės galvutės varžtais, pozicija 9, varžtai sukami 0.9 Nm jėga ir prieš sukimą ant varžtų patepami „Loctite 243“ klijai, paskutinėje operacijoje ant plastikinės detalės „laikiklis“ uždedamas sandariklis, pozicija 7 (žr. 3 pav.). Bendras surinktas mazgas pavadinamas – surinktas mazgas I.



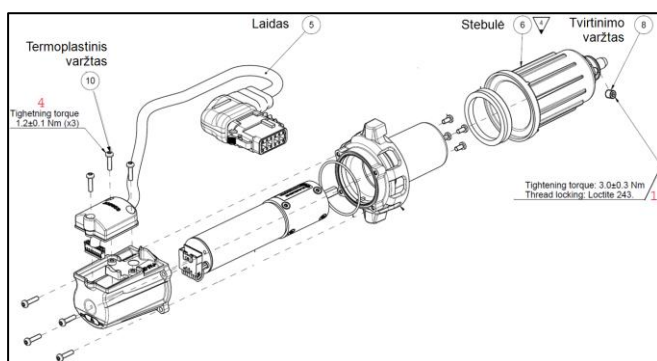
3 pav. Pirmoje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas mazgas I

Antru etapu surenkamos trijų pozicijų detalės, kurios yra – O formos sandarinimo žiedas, pozicija 2, šis įdedamas į surinkto mazgo I, detalės – „laikiklis“ griovelį, ant viršaus dedama detalė dangtis, pozicija 3, ši detalė prisukama prie, surinkto mazgo I, detalės – laikiklis, termoplastiniais varžtais, pozicija 10 (žr. 4 pav.). Bendras surinktas mazgas pavadinamas – surinktas mazgas II.



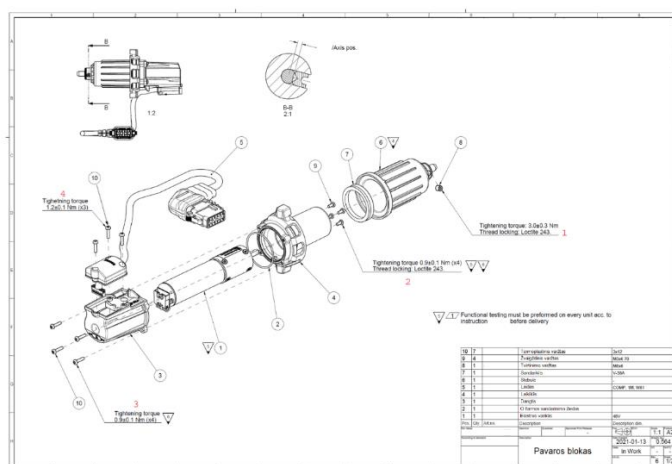
4 pav. Antroje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas mazgas II

Trečiu etapu surenkamos keturių pozicijų detalės, pirmiausiai yra užmaunama ant surinkto mazgo II stebulė, pozicija 6, tuomet yra prijungiamas laidas, pozicija 5, laido dangtelis uždedamas ir prisukamas termoplastiniais varžtais, 0,9 Nm jėga. Tada galiausiai, panaudojus klijus, prisukamas tvirtinimo varžtas, 3 Nm jėga, pozicija 8 (žr. 5 pav.).



5 pav. Trečioje įrangos dalyje surenkamos detalės. Surinktas pavaros blokas

Apibendrinant galima teigti, kad rankinis surinkimas vyksta aiškia seka, tačiau visas procesas išlieka stipriai priklausomas nuo operatoriaus dėmesio ir patirties. Kiekviename etape išlieka rizika praleisti vieną iš komponentų ar atlikti operaciją netinkamai, o tai gali lemti broką, prastovas ar papildomą perdirbimą. Atsižvelgiant į tai, kad surenkamas mazgas turi brangų elektros variklį, tokių klaidų kaina yra didelė, todėl rizikų panaikinimas tampa būtinybe. Ši rankinio surinkimo seka toliau bus naudojama ir projektuojant pusiau automatizuotą įrangą, bus išlaikomas tas pats operacijų eiliškumas.

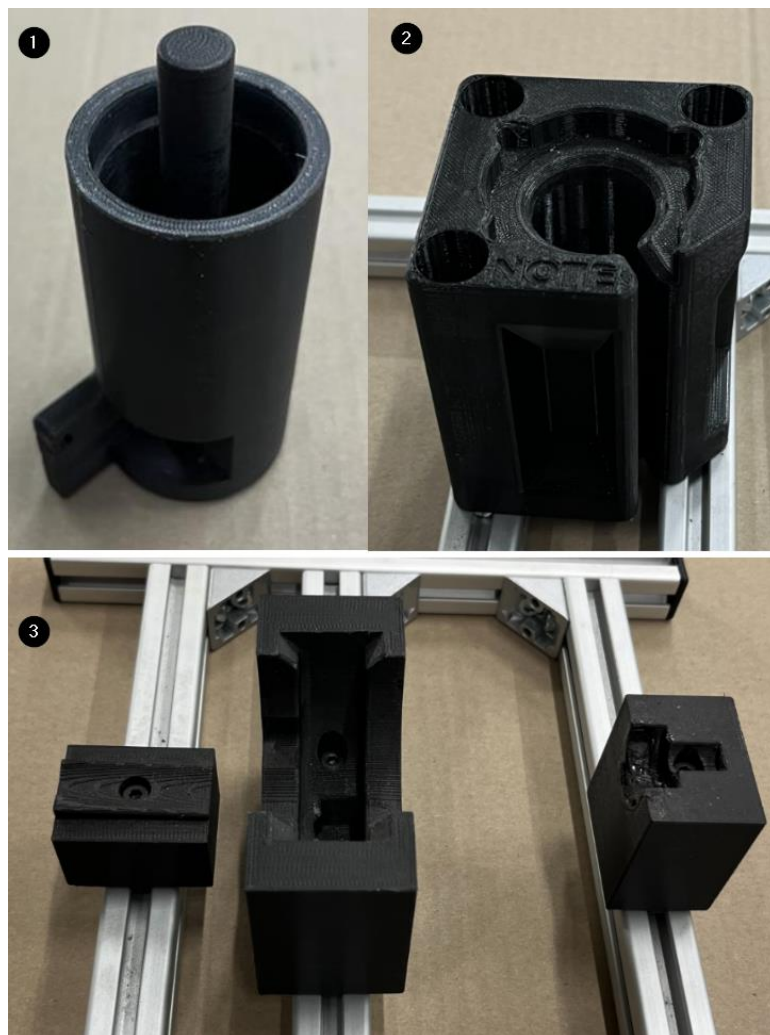


6 pav. Detalės surinkimo brėžinys

2.2. Rankinio surinkimo laiko skaičiavimas ir problemos

Esant rankiniam surinkimui, buvo atliktas kelių nuoseklių operacijų ciklo trukmės įvertinimas. Tikslas – nustatyti, kiek laiko užtrunka vieno gaminio surinkimas taikant įprastinį, įmonėje naudojamą rankinį procesą. Eksperimente dalyvavo du operatoriai, kurie naudojos standartine rankine įranga – tokia pačia, kokia buvo surenkami variklio mazgai gamyboje.

Kiekvienas operatorius atliko tris pagrindines mazgo surinkimo operacijas, o jų trukmės buvo išmatuotos chronometru. Gauti rezultatai susisteminti ir pateikti 2 lentelėje. Šie duomenys vėliau naudojami analizuojant rankinio proceso efektyvumą ir lyginant jį su projektuojama pusiau automatizuota surinkimo įranga.



7 pav. Rankinio surinkimo įranga prieš pokyčius. 1 – rankinis gumos prispaudėjas, 2 – 3D spausdintas įdėklas, 3 – įdėklas detalei pasidėti

Rankiniu būdu naudojama įranga atrodė taip, kaip pavaizduota 7 paveikslėlyje. Pirmasis mazgas buvo surenkamas pasitelkiant rankinį gumos prispaudėją ir specialiai šiai operacijai pritaikytą 3D spausdintą įdėklą, kuris padeda stabiliai įstatyti variklį su detale (pozicijos 1 ir 2 surinkimo brėžinyje). Antrojo mazgo surinkimas buvo sudėtingesnis, nes detalės turėjo būti laikomos rankoje – tai kėlė didelį diskomfortą operatoriui ir didino tikimybę padaryti klaidą. Trečiajame etape buvo naudojamas dar vienas 3D spausdintas įdėklas, kuris fiksavo jau surinktą bloką ir leido patogiai, bei tiksliai prisukti varžtus.

2 lentelė. Rankinio surinkimo ciklo skaičiavimas

Operatorius	Pirmo mazgo surinkimas		Antro mazgo surinkimas		Trečio mazgo surinkimas		Bendras laikas	
	min	s	min	s	min	s	min	s
1.	1	42	1	49	1	38	5	09
2.	2	04	1	52	1	22	5	18

Surinkimas buvo atliekamas matuojant dviejų operatorių ciklo laikus, detales surinkinėjant be jokios specializuotos kontrolės įrangos. Eksperimento metu laikas fiksuotas po kiekvieno mazgo surinkimo, o visi duomenys suvesti į 2 lentelę. Vertintas tik pats surinkimo veiksmas – į skaičiavimus nebuvo įtrauktas laikas, skirtas detalių pakavimui ar variklių funkciniais testams.

Gauti rezultatai rodo, kad rankinis surinkimas, atliekamas be jokių pagalbinių įrenginių, vidutiniškai trunka 5 minutes ir 14 sekundžių. Taip pat aiškiai matyti, kad pirmo ir antro mazgo surinkimo etapuose laikas yra didžiausias. Pirmojoje stadijoje ilgesnį ciklą lemia rankinis gumos prispaudėjo naudojimas, bei klijų dozavimas ant keturių varžtų, kas užima daug papildomo laiko. Antrojoje stadijoje procesas ilgėja dėl neergonomiškos surinkimo pozicijos – detalės laikomos rankoje, todėl operacija tampa nepatogi ir lėtesnė. Tuo tarpu trečiajame mazge laikas trumpiausias, nes čia reikia dozuoti klįjus tik ant vieno varžto, o laido uždėjimas ir varžtų prisukimas yra patogus ir greitas procesas.

2.3. Rizikos vertinimas taikant *FMEA*

Siekiant įvertinti surinkimo proceso patikimumą ir nustatyti galimus rizikos taškus, buvo atlikta *FMEA* analizė (angl. *Failure Mode and Effects Analysis*). Šis metodas leidžia identifikuoti galimas klaidas, įvertinti jų pasekmes, tikimybę ir aptikimo galimybę, o taip pat nustatyti prioritetus tolesniam proceso tobulinimui (žr. 3 lentelę).

S (*Severity*) – pasekmių rimtumas, jei klaida įvyktų.

O (*Occurrence*) – tikimybė, kad klaida įvyks.

D (*Detection*) – klaidos aptikimo tikimybė prieš pateikiant gaminį.

3 lentelė. Rankinio surinkimo *FMEA* skaičiavimas

Nr.	Procesas/veiksmas	Galimas Gedimas	Pasekmė	S	O	D	RPN	Esamos / Siūlomos Kontrolės Priemonės
1.	Klijų Loctite 243 panaudojimas ant 9 poz. varžto	Ant varžto nėra klijų	Varžtai nuo variklio vibracijų atsisuks	7	8	6	336	Įrengti klijų paėmimo/padėjimo žingsnius, kad klįjai būtų paimti
2.	Variklio 1 poz. montavimas su plastikine detale 4 poz. su 9 poz. varžtais	Varžtas neįsuktas	Variklis atsiskiria veikimo metu	9	5	3	135	1. Įrengti varžto prisukimo sukuto mechaninis mygtukas. 2. Patikrinti varžtų buvimą induktyviais jutikliais

Nr.	Procesas/veiksmas	Galimas Gedimas	Pasekmė	S	O	D	RPN	Esamos / Siūlomos Kontrolės Priemonės
3.	7 poz. gumos uždėjimas	Atvirkščiai uždėta guma, neuždėta guma	Didesnė tikimybė patekti skysčiam į detalės vidų, ant variklio	7	5	8	280	1. Kontroliuojamas žingsnis, kad panaudoti įrankį, kuris prispaudžia gumą 2. Gumos pozicijos patikrinimas lazeriu
4.	Tarpinės o-ring 2 poz. įdėjimas	Nesandari vieta tarp plastikinių detalių	Didesnė tikimybė patekti skysčiam į detalės vidų, ant variklio	7	7	8	392	1. Sukurti įrankį, kurį panaudojus guma įdėdama. 2. Lazeriniu kontrasto jutikliu, tikrinti ar yra tarpinė
5.	Plastikinės detalės 3 poz. prisukimas su varžtais 10 poz.	Nesurinktos detalės	Nesurinktos plastikinės detalės tarpusavy, išsiardys	6	2	3	36	1. Įprogramuoti žingsnis skirtas prisukti detales 2. Varžtų buvimą tikrinti su induktyviniais jutikliais
6.	Laido 5 poz. sujungimas su varikliu 1 poz.	Nesujungtas laidas	Nesisuks, neveiks variklis	8	5	8	320	Surinkto variklio kontrolė ar veikia
7.	Laido dangtelio 5 poz. prisukimas su 10 poz. varžtais	Neprisuktas dangtelis	Bus palaidas atsiskyręs dangtelis su laidu	6	2	3	36	1. Įprogramuoti žingsnį skirtas prisukti detales. 2. Varžtų buvimą tikrinti su induktyviniais jutikliais
8.	Klijų panaudojimas ant 8 poz. varžto	Ant varžto nėra klijų	Varžtas nuo variklio vibracijų atsisuks	6	8	7	336	Įrengti klijų paėmimo/padėjimo žingsnius, kad klijai būtų paimti
9.	Detalės 6 poz. su 8 poz. varžtu prisukimas	Varžtas neįsuktas	Detalė 6 poz. atsiskiria ir nebeperduoda sukimo momento	9	5	4	180	1.Įprogramuoti žingsnį skirtą prisukti detales. 2. Tikrinti prisukto varžto gylį. Tikrinama ar varžtas yra ir ar varžtas tinkamai prisuktas
10.	Surinktos detalės variklio laido ir variklio patikrinimas	Nepatikrintas variklis ir laidas	Variklis gali nukeliauti pas klientą neveikiantis	7	4	7	196	Įprogramuoti žingsnį skirtą patikrinti detales. Nuspaudžiamas mygtukas, kai atlikta kontrolė

Atlikus rankinio surinkimo proceso *FMEA* analizę, aiškiai išryškėjo penki didžiausi rizikos veiksniai, kurie turi didžiausią įtaką gaminio kokybei ir saugiam veikimui. Didžiausią *RPN* balą turi O formos tarpinės įdėjimo operacija ($RPN = 392$). Tai vienas kritiškiausių etapų, nes neteisingai įdėta arba visai neįdėta tarpinė tiesiogiai lemia nesandarumą ir skysčių patekimą į variklio zoną. Šios klaidos pavojus yra aukštas, o aptikimo tikimybė – maža, nes po surinkimo tarpinė nesimato vizualiai, ji pasidengia po detales. Dėl to būtina įdiegti tiek mechaninius sprendimus tarpinei įstatyti, tiek lazerinį buvimą patikrinimą.

Antra operacija pagal riziką sudaro sriegio klijų nepanaudojimas ant varžtų ($RPN = 336$, dvi atskiros operacijos). Kadangi klijų kiekis vizualiai beveik nepastebimas, operatorius šią užduotį gali lengvai praleisti. Be klijų varžtai gali išsisukti nuo vibracijų, todėl klaidos padariniai yra rimti, o aptikimas

rankiniu būdu – beveik neįmanomas. Šiam procesui būtina įvesti žingsninį klijų paėmimo patvirtinimą arba fizinį priverstinį proceso vedimą.

Aukštą *RPN* rodiklį taip pat turi gumos montavimas ($RPN = 280$). Guma gali būti uždėta neteisingai arba pamiršta visai, o dėl to didėja rizika, kad skystis pateks į vidų ir pažeis variklį. Ši operacija taip pat priskiriama prie sunkiai aptinkamų po surinkimo, todėl reikalingi du *Poka-Yoke* principu sukurti sprendimai, kurie užtikrins gumos būvimą.

Kita reikšminga rizika, laido neprijungimas prie variklio ($RPN = 320$). Jei laidas nesujungtas, variklis apskritai neveiks, o klaida gali būti pastebima tik atlikus galutinį testą. Kadangi operatorius gali ne visada atlikti funkcinį bandymą, tai tampa kritiniu gedimu. Todėl naujoje sistemoje numatomas privalomas funkcinis variklio testavimas.

Galiausiai, prie aukščiausių *RPN* patenka variklio funkcinės patikros praleidimas ($RPN = 196$). Nors jo *RPN* kiek mažesnis, nei ankstesnių, ši operacija yra paskutinė surinkimo proceso kontrolės grandis. Jei ji neatliekama, įmonė rizikuoja klientui išsiųsti neveikiantį gaminį. Dėl to būtina užtikrinti privalomą patikros žingsnį HMI valdymo logikoje, kartu sukuriant mechaninį patvirtinimo mygtuką.

Apibendrinant galima teigti, kad didžiausią riziką kelia operacijos, kurių rezultatas po surinkimo nebematomos akimis (klijai, tarpinė, guma) arba kurių poveikis tiesiogiai lemia gaminio veikimą (laido jungtis, funkcinis testas). *FMEA* analizė taip pat parodė, kad surinkimo klaidos ypač pavojingos dėl to, kad surenkamas mazgas turi brangų variklį – bet koks defektas reiškia ne tik papildomas išlaidas, bet ir riziką sugadinti komponentą, kuris vertinamas kaip didžiausia gaminio vertės dalis. Siekiant užbėgti įvykiams už akių ir iš anksto eliminuoti klaidas, pasirinkta diegti pusiau automatizuotą sprendimą, paremtą *Poka-Yoke*, jutikliais, žingsnine *PLC* logika ir specialiais mechaniniais įrankiais. Siūlomos kontrolės priemonės orientuotos į aptikimo ir pasikartojimo reikšmių sumažinimą.

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Apibendrinant galima teigti, kad situacijos prieš pokyčius analizė leido nuosekliai susipažinti su gaminio konstrukcija ir visa rankinio surinkimo eiga, kuri vėliau bus perkelta ir į pusiau automatizuotą sprendimą. Laiko matavimai parodė, kad rankinis procesas yra gana lėtas (vidutiniškai 5 min. 14 s) ir kai kuriose operacijose neergonomiškas, dėl to operatoriui tenka dirbti nepatogiose pozicijose ar naudoti papildomas rankines priemones. *FMEA* analizė išryškino didžiausius rizikos taškus – operacijas, kurių klaidos po surinkimo tampa nematomos (klijai, tarpinė, guma) arba tiesiogiai lemia gaminio veikimą (laido jungtis, galutinė patikra). Šios rizikos ypač svarbios dėl to, kad surenkamas mazgas turi brangų variklį, todėl bet koks defektas gali sukelti reikšmingų nuostolių. Visi šie rezultatai pagrindžia poreikį pereiti prie pusiau automatizuotos kontrolės įrangos, kurioje bus naudojama ta pati surinkimo seka, tačiau su *Poka-Yoke*, jutikliais ir žingsnine *PLC* logika leis sumažinti klaidų tikimybę ir padidinti proceso patikimumą.

3. Naujos sistemos diegimas ir lyginimas

Rankinis surinkimo procesas, nors ir vyksta aiškia seka, išlieka jautrus žmogiškosios klaidoms, o jų pasekmės tiesiogiai atsispindi gaminio kokybėje ir gamybos sąnaudose. Todėl tampa būtina sukurti sprendimą, kuris leistų tą pačią surinkimo logiką atlikti patikimiau, kontroliuojant visus kritinius žingsnius ir panaikinant galimybę operatoriui suklysti. Šio skyriaus tikslas – parodyti, kaip rankinio proceso analizė ir identifikuotos rizikos buvo paverstos realiais konstrukciniais ir programiniais sprendimais, leidžiančiais automatizuoti tikrinimo etapus ir stabilizuoti surinkimo eigą. Čia nagrinėjama, kaip buvo suprojektuota ir įdiegta pusiau automatizuota įranga, kokie *Poka-Yoke* principai buvo pritaikyti, kaip sukurta *PLC* logika ir *HMI* vedimas padeda operatoriui, bei kaip šie sprendimai leidžia pasiekti didesnę proceso patikimumą ir mažesnę broko tikimybę.

3.1. Įrangos projektavimo pagrindimas

Projekto pradžioje svarbu nusistatyti aiškią viziją, kaip bus projektuojama įranga ir kaip ji veiks. Proto šturmo pagalba buvo generuojamos idėjos ir realios projektavimo galimybės, atsižvelgiant į kelis pagrindinius kriterijus:

- kad surinkimo procesas būtų atliekamas sklandžiai ir nuosekliai,
- kad būtų užtikrinta maksimali kokybė,
- kad projektas neišaugtų į pernelyg sudėtingą ir sunkiai įgyvendinamą sistemą.

Remiantis rankinio surinkimo patirtimi, procesas buvo padalintas į tris dalis, o kiekvienai jų sukurta po atskirą įrangą. Tai daroma, kad išvengti įrangos sudėtingumo, nes išskaidžius daug operacijų į mažesnes operacijų grupes, šias yra lengviau sukontroliuoti, projektavimas pasidaro sklandus ir paprastesnis, paprasčiau užtikrinti klaidų eliminavimą, lengviau išmastyti ir įgyvendinti loginę seką. Išskaidžius surinkimo procesą į kelis surinkimo modulius, įranga tampa patogesnė eksploatuoti, o galimų klaidų aptikimas ir šalinimas tampa greitesnis. Be to, sprendimas projektuoti tris įrangas ir jas apjungti į vieną sistemą priimtas atsižvelgiant ir į pavaros komponentų pozicijų, bei surinkimo eigos ypatumus.

Projektuojant pusiau automatizuotą įrangą buvo nustatyti pagrindiniai techniniai ir konstrukciniai kriterijai, siekiant užtikrinti proceso patikimumą, operatoriaus saugumą ir įrangos ilgaamžiškumą. Projektavimas grindžiamas keturiais esminiais principais: ergonomika, saugumu, moduline konstrukcija ir gaminių specifiška.

Ergonomika. Įranga suprojektuota taip, kad operatoriui būtų patogų atlikti veiksmus natūraliais judesiais – įdėti detales, jas prisukti ir išimti surinktą mazgą. Įrangos aukštis, laikiklių padėtys ir fiksavimo mechanizmai parinkti atsižvelgiant į žmogaus darbo poziciją, kad sumažėtų fizinis nuovargis ir būtų užtikrintas tikslus, stabilus darbas.

Saugumas. Kiekviename įrangos etape integruoti fiksavimo elementai, jutikliai ir ribotuvai, užtikrinantys, kad operatorius negalėtų atlikti pavojingo ar neteisingo veiksmo. Pritaikytas *Poka-Yoke* klaidų prevencijos principas – detalės geometriškai suprojektuotos taip, kad jų būtų neįmanoma įdėti kitaip nei numatyta. Loginė įrangos valdymo seka užtikrina, kad kitas veiksmas būtų aktyvus tik tuomet, kai sėkmingai įvykdytas ankstesnis žingsnis. Tokiu būdu eliminuojamos žmogaus klaidos ir užtikrinama surinkimo kokybė bei proceso saugumas.

Modulinė konstrukcija. Įranga paremta aliuminio profilių konstrukcija, leidžiančia greitai keisti ar papildyti komponentus, kai reikia atlikti pakeitimus ar atnaujinimus. Šis sprendimas sumažina projektavimo laiką ir palengvina ateities atnaujinimus. Nestandartinės laikymo ir atraminės detalės gaminamos 3D spausdinimo būdu iš plastiko, todėl jas galima greitai pritaikyti pagal naujus reikalavimus ar detalių geometriją, taip pat gaminti detales iš spausdintos medžiagos yra pigu.

Gaminių specifika. Atsižvelgiant į surenkamų gaminių medžiagas ir apkrovas, įrangoje derinamos plastikinės ir metalinės detalės. Lengvos 3D spausdintos plastikinės dalys suteikia konstrukcijai lankstumo ir leidžia išvengti gaminio paviršiaus pažeidimų, o metaliniai kaiščiai, įvorės ir poveržlės naudojami tose vietose, kur veikia didesnės mechaninės apkrovos ar atsiranda kontaktas su kitais komponentais. Tai užtikrina įrangos ilgaamžiškumą, atsparumą dilimui ir tvirtą detalių pozicionavimą.

Apibendrinant galima teigti, kad įranga sukurta laikantis nuoseklios loginės sekos, modulinės konstrukcijos principo ir *Poka-Yoke* klaidų prevencijos metodikos. Tokia projektavimo strategija leidžia ne tik užtikrinti kokybišką ir stabilų surinkimą, bet ir suteikia galimybę lengvai atlikti neįvykius konstrukcinius, programinius pakeitimus ateityje.

3.2. Įrangos projektavimas ir proceso loginė seka

Pusiau automatizuotos įrangos kūrimas buvo pradėtas nuo mechaninės dalies projektavimo, remiantis anksčiau išanalizuotu rankiniu surinkimo procesu. Rankiniu būdu vykdyto surinkimo eiliškumas tapo preliminarine loginė seka, pagal kurią buvo formuojama naujos sistemos struktūra. Remiantis šia seka, surinkimo procesas buvo suskirstytas į tris modulius – tris atskiras įrangas, kurios atitinka tris pagrindinius gaminio surinkimo etapus.

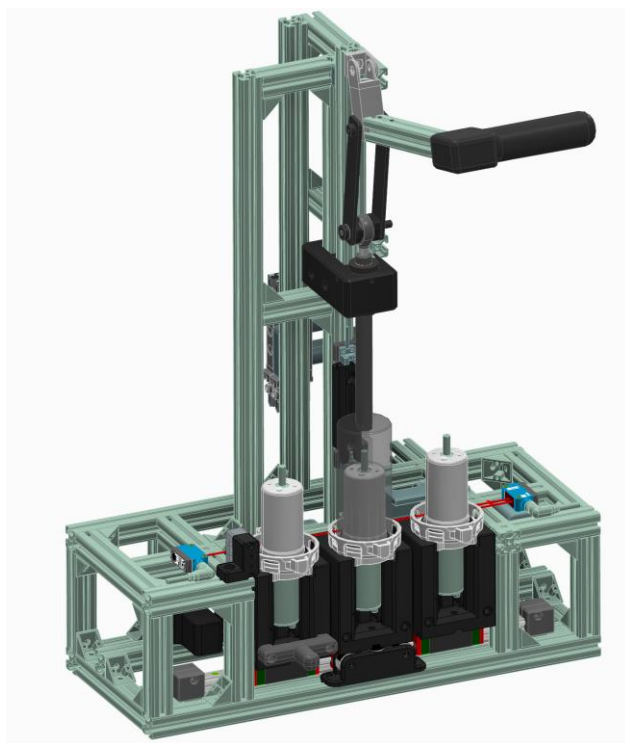
Projektavimo metu kiekvienai įrangai buvo numatyta, kokias konkrečias detales ji surenka ir kokie valdymo bei tikrinimo elementai turi būti integruoti. Šiame etape buvo diegiami *Poka-Yoke* principu paremti sprendimai, užtikrinantys, kad operatorius negalėtų atlikti neteisingų veiksmų. Įrangose įdiegti įvairūs techniniai, kontroliniai sprendimai, kurie tikrina veiksmų atlikimo seką ir surinktus komponentus – mygtukai, lazeriniai jutikliai, fotojutikliai, induktyviniai jutikliai, spaustuvai ir mechaniniai fiksatoriai, kurie tikrina kiekvienos operacijos įvykdymą.

Kiekviena įranga buvo kuriama etapais: pirma suprojektuota mechaninė konstrukcija, detalių laikymo ir kontroliniai sprendimai, o vėliau, turint aiškią veiksmų seką, buvo kuriama valdymo programa ir loginė proceso seka, leidžianti tikrinti kiekvienos operacijos atlikimą. Tokiu būdu buvo užtikrinta, kad surinkimas vyktų nuosekliai ir tik po visų patikrų galima būtų pereiti prie kito žingsnio.

Toliau kituose skyreliuose pateikiami trijų sukurtų įrangų aprašymai, jų veikimo principai, integruoti tikrinimo metodai ir proceso loginė seka.

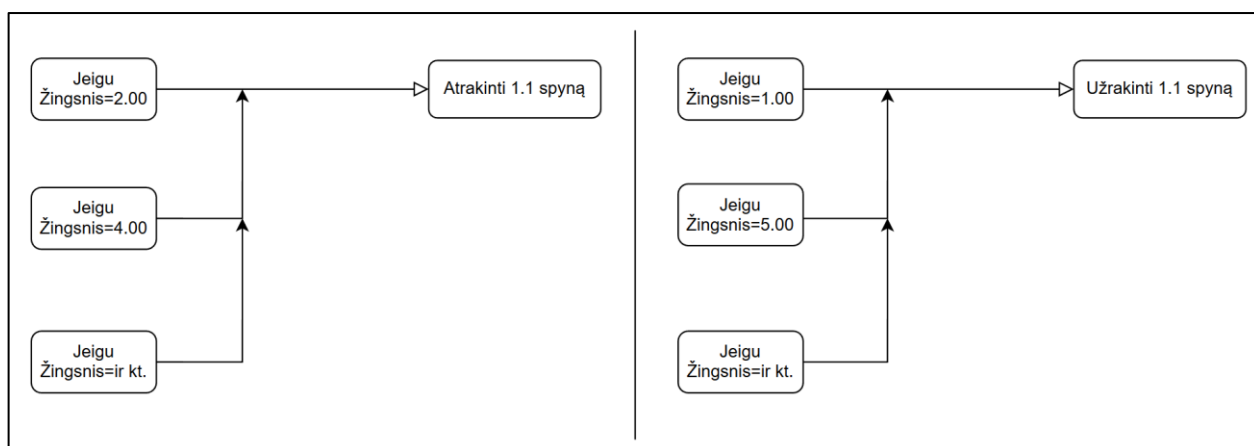
3.2.1. Įrangos pirmas surinkimo mazgas

Su pirma įranga surenkama variklio pradžia. Pirmos įrangos bendras vaizdas pavaizduotas 8 paveikslėlyje.

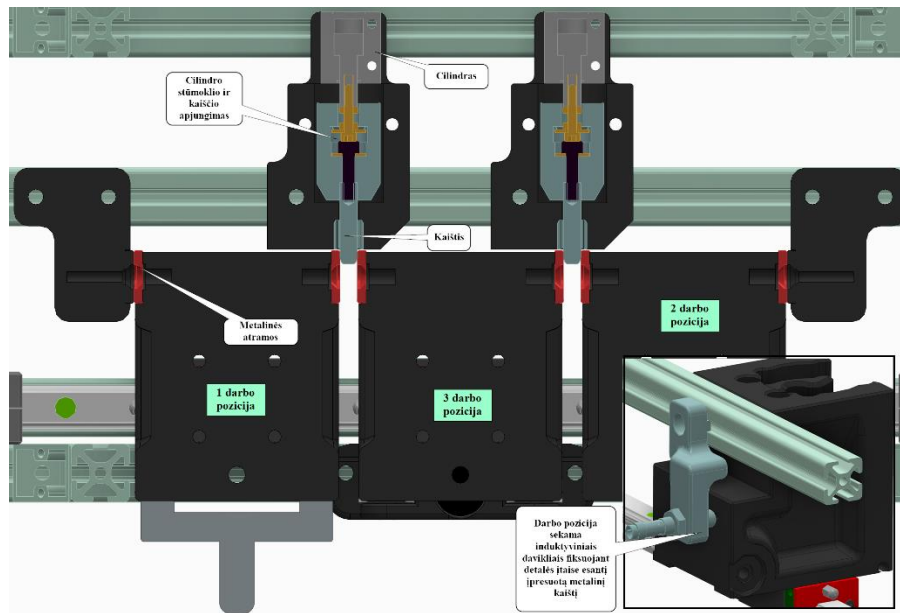


8 pav. Pirmo įrangos mazgo bendras vaizdas

Kadangi sistema projektuojama taikant žingsninį metodą, būtina tiksliai sekti, kurioje pozicijoje kiekvienu momentu yra detalė ir ar ji tinkamai fiksuota. Siekiant užtikrinti, kad surinkimo metu detalė nejudėtų iš nustatytos darbo zonos, kiekvienoje įrangoje integruotas mechaninis spynos sprendimas, veikiantis kartu su pneumatiniiais cilindrais. Tokiu būdu detalė įstatoma į tikslią padėtį ir fiksuojama operacijos ciklo metu. Detalės įtaisas prisukamas prie kariatėlės, kuri užtikrina linijinio judėjimo kryptį bėgeliu. Detalės įtaiso padėtis ir spynos būklė stebimos induktyviniais jutikliais, kurie patvirtina, kad įtaisas yra užfiksuotas teisingoje pozicijoje ir galima vykdyti tolimesnį proceso žingsnį (žr. 10 pav.). Spynos suprogramuotos taip, kad prie atitinkamo reikiamo esančio žingsnio šios atsirakina arba užsirakina. Spynų valdymo loginė grandinė yra suaktyvinama esant prie skirtingo žingsnio (žr. 9 pav.). Šis sprendimas kartojamas visose trijose įrangoje, todėl projektavimas pasidaro paprastesnis.

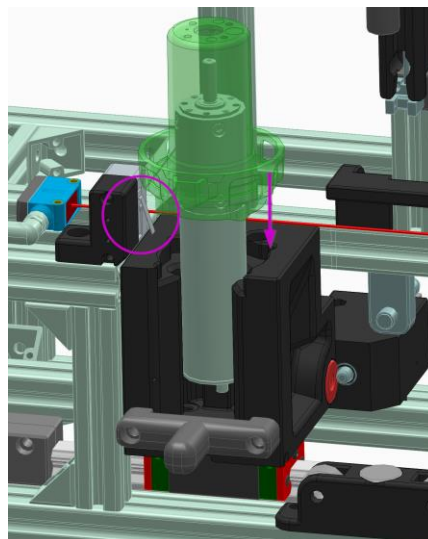
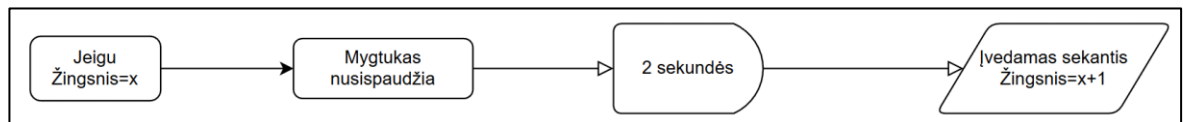


9 pav. Spynų valdymo loginė schema



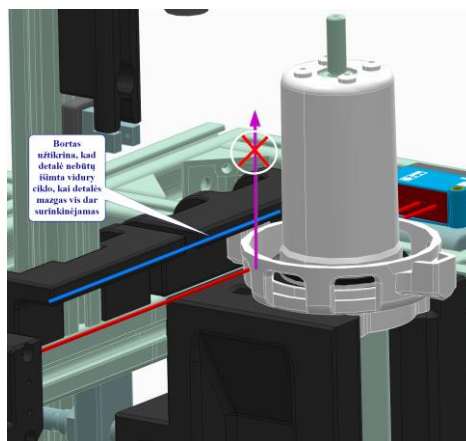
10 pav. Mechaninis spynos sprendimas ir darbo pozicijos sekimas

Pirmoje darbo pozicijoje stebima, kada yra uždedama plastikinė detalė ant variklio, uždedant detalę mygtukas nusispaudžia, tokiu būdu leidžiama judėti toliau. Šioje pozicijoje, išnaudojus plastikinės detalės geometriją, pritaikoma *Poka-Yoke* metodika, kuri užtikrina, kad detalė gali būti įstatoma tik vieną ir ta pačia puse. Jeigu detalė įstatoma, kitaip tuomet ji neįkrenta į dėtuotę ir lieka išsikišusi į aukštį. Tokiu būdu užtikrinamas pasikartojamumas, kad detalė pastoviai būtų įstatoma ta pačia kryptimi (žr. 11 pav).



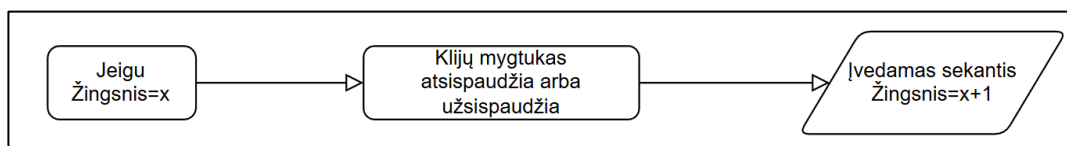
11 pav. Detalės ir variklio įdėjimo žingsnis ir loginė schema

Visose trijose įrangose pasikartoja **detalės borto sprendimas**, skirtas užtikrinti, kad operatorius negalėtų išimti mazgo proceso viduryje, kai mazgas yra surinkimo procese. Toks sprendimas įdiegtas tam, kad būtų išvengta sistemos žingsnių peršokimo ir neatsirastų nepilnai surinktų gaminių galutinėje stadijoje (žr. 12 pav.).

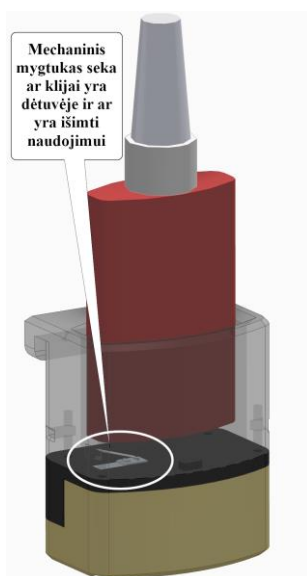


12 pav. Detalės bortas, kad neišimti detalės

Pagal surinkimo brėžinio reikalavimus, tam tikrose pozicijose būtina ant varžtų patepti klijų. Siekiant užtikrinti, kad ši operacija nebūtų praleista, į sistema integruotas **klijų paėmimo sekimo sprendimas**. Šiuo sprendimu stebima, kada klijų buteliukas yra savo vietoje, dėtuvėje ir kada jis yra paimtas (žr. 13 pav.). Dėtuvėje įrengtas mechaninis mygtukas, kuris fiksuoja klijų paėmimo ir padėjimo veiksmus (žr. 14 pav.). Atėjus proceso etapui, kai klijai turi būti panaudoti, sistema paprašo paimti buteliuką, taip primenant operatoriui, kad reikia naudoti kljus. Panaudojus kljus yra paprašoma buteliuką padėti atgal į vietą, kad sekančio ciklo metu būtų galima vėl užtikrinti klijų panaudojimo kontrolę.



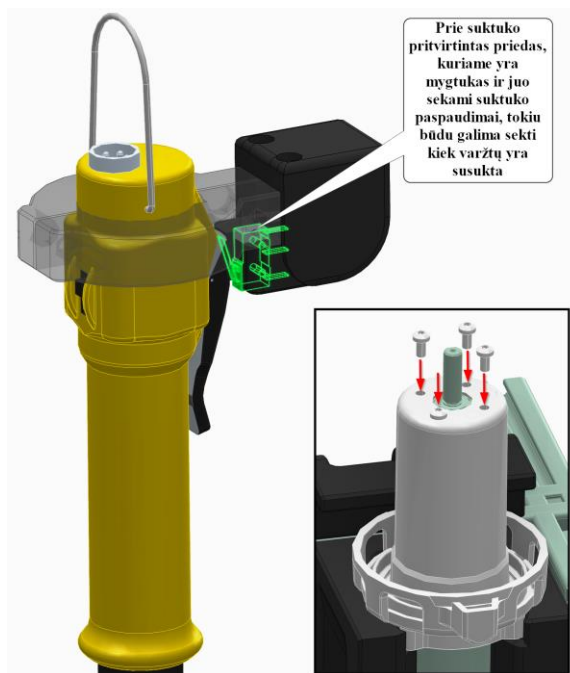
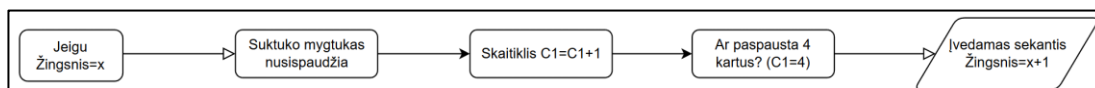
13 pav. Klijų panaudojimo sekimo sprendimo loginė schema



14 pav. Klijų panaudojimo sekimo sprendimas

Tuomet sekančiu žingsniu reikia susukti keturis, su kljais suteptus, varžtus, kad sekti varžtų susukimą prie suktuko yra primontuotas mygtukas, kurį nuspaudus yra skaičiuojama kiek paspaudimų buvo

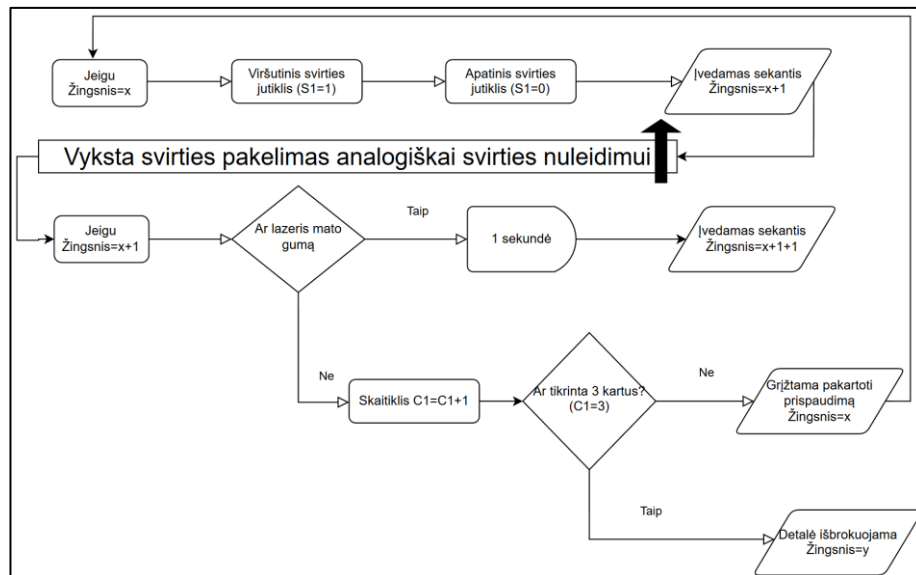
atlikta. Dangtelį prisukti prie variklio reikia keturių varžtų, tai nuspaudus keturis kartus sistema supranta taip, kad varžtai jau prisukti (žr. 15 pav.). Šio sprendimo pliusas, kad tai paprasta įgyvendinti ir sprendimas nėra brangus, minusas tas, kad netyčia nuspaudus mygtuką, sistema užfiksuoja, kad yra įsuktas vienas varžtas, į šią problemą bus atsižvelgta tolimesniuose žingsniuose, kad užtikrinti gaminio komponentų surinkimą.



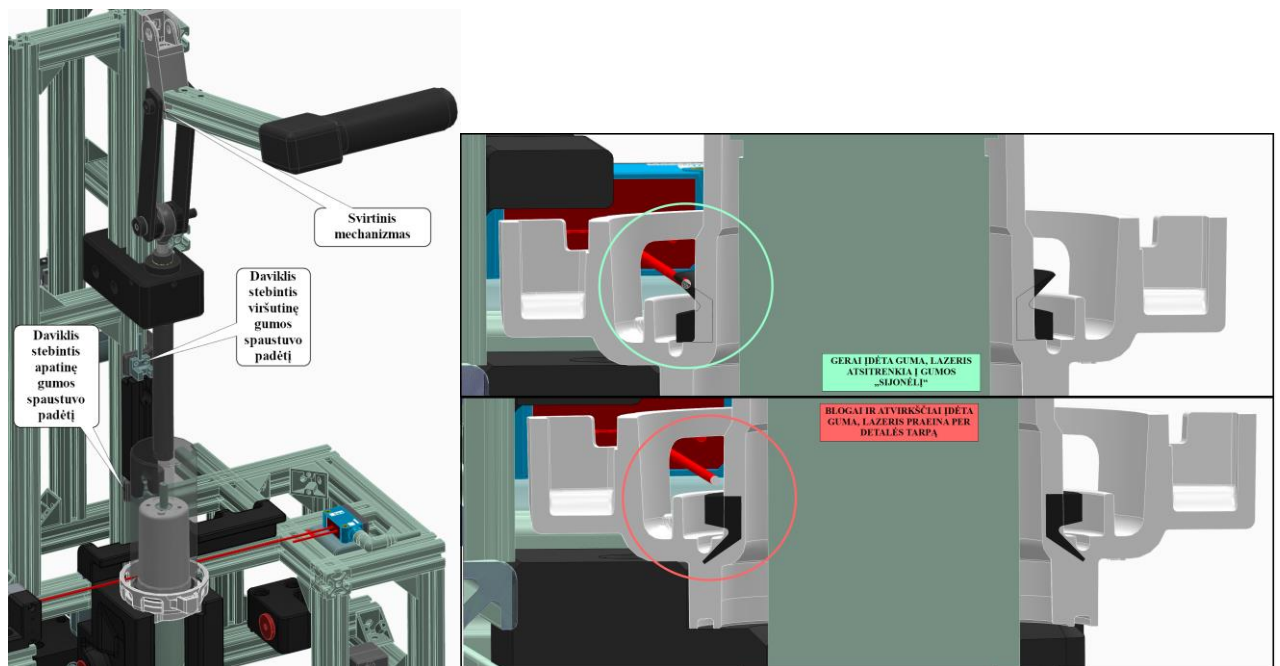
15 pav. Suktuko mygtuko adapteris, fiksuojantis paspaudimus ir varžtų įsukimo veiksmus. Veiksmo loginė schema

Paskutinėje pirmos įrangos darbo pozicijoje yra užmaunama guma – sandariklis. Kad ši operacija būtų patikimai atlikta ir sandariklis pilnai nuslęstų iki detalės galo, įdiegta **svirtinio mechanizmo sistema** (žr. 17 pav.). Šiuo sprendimu užtikrinama, kad spaustuvas būtų nuspaustas iki apatinės dalies ir grąžintas į pradinę būseną. Šiam veiksmui stebėti naudojami U formos foto jutikliai. Prie slankiklio yra išnešta vėliavėlė, kuri uždengia U formos jutikliui vaizdą, tokiu būdu žinoma slankiklio padėtis.

Po sandariklio prispaudimo vyksta gumos kontrolė, kurios metu tikrinama, ar guma įdėta ir ar ji nėra užmauta atvirkščiai. Kontrolei naudojamas lazerinis jutiklis, nukreiptas į detalės tarpą. Jeigu lazerio spindulys pataiko į gumos „sijonėlį“ – spindulys yra užblokuojamas, tai reiškia, kad sandariklis užmautas teisingai. Kitu atveju, jei guma užmauta atvirkščiai, svirtinis mechanizmas ją prispaudžia prie dugno, o „sijonėlis“ lieka apačioje – lazeris pamato kiaurymę, todėl fiksuojama klaida ir leidžia operaciją kartoti. Analogiškai sistema reaguoja ir tada, kai guma visai neuždėta – lazerio spindulys praeina laisvai, o sistema pateikia klaidos signalą ir duoda pakartoti iš naujo. Kad išvengti begalinio pakartojimų skaičiaus, ši kontrolė vyksta tris kartus, po to sistema prašo apžiūrėti detalę ir jei reikia ją išbrokuoti (žr. 16 pav.).



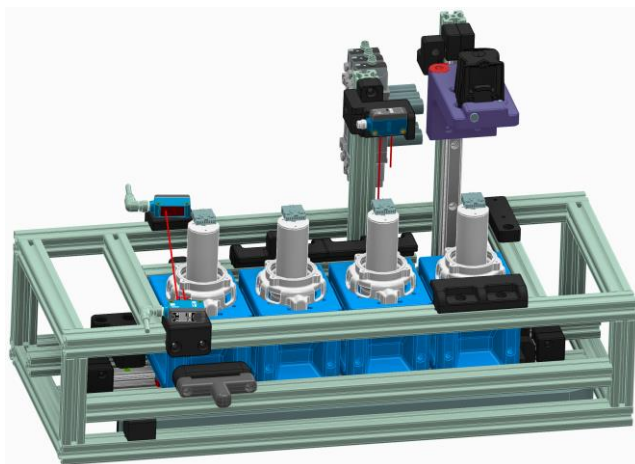
16 pav. Gumos patikrinimo loginė schema.



17 pav. Pirmo įrangos mazgo trečia darbo pozicija. A- svirtinis mechanizmas, B- gumos būvimo, bei įdėjimo krypties patikrinimas lazeriu

3.2.2. Įrangos antras surinkimo mazgas

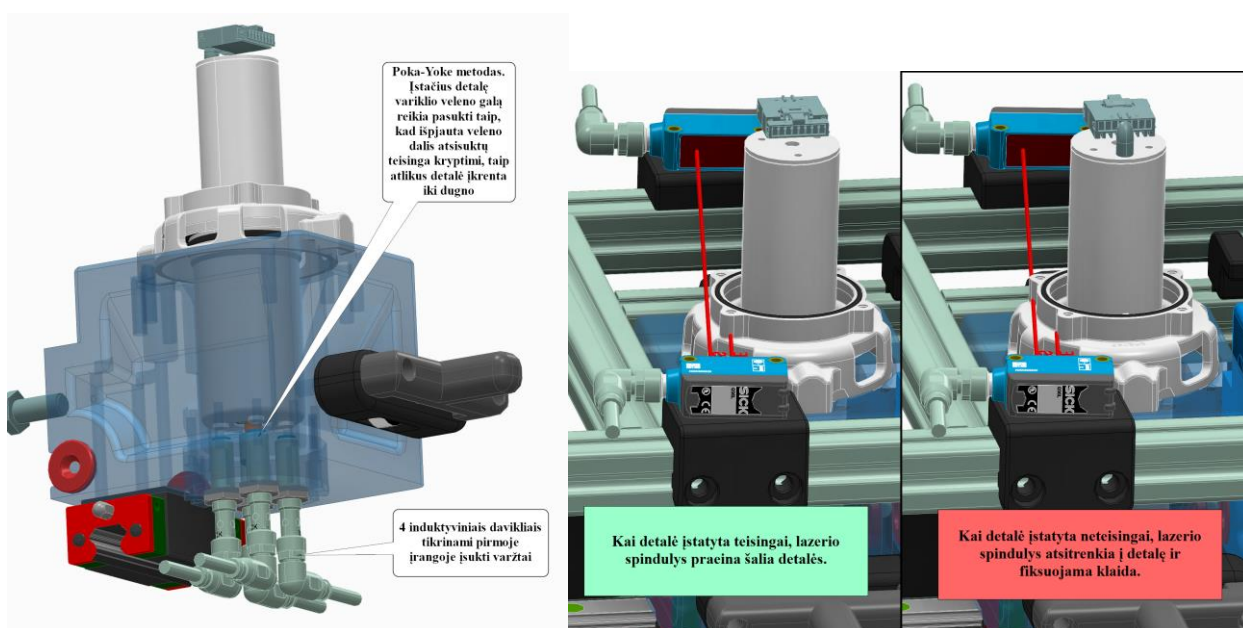
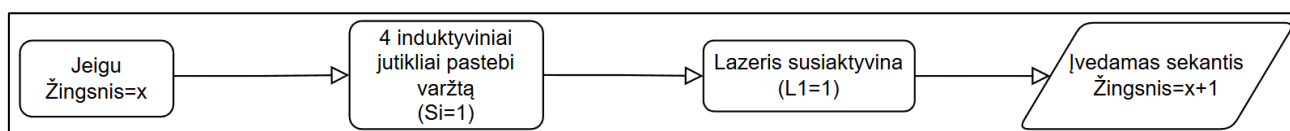
Su antra įranga surenkama – O formos tarpinė ir detalės dangtelis. Įrangą sudaro keturios darbo pozicijos, stotelės, kuriose atliekami tvirtinimo, surinkimo ir kontrolės veiksmai (žr. 18 pav.). Šioje įrangoje pasikartoja tas pats, kaip ir kitose įrangoose, spynų mechanizmas, naudojamas borto sprendimas, kad detalę neišimti viduryje ciklo ir taip pat varžtų prisukimui naudojamas suktukas su mygtuko paspaudimo adapteriu.



18 pav. Antro įrangos mazgo bendras vaizdas

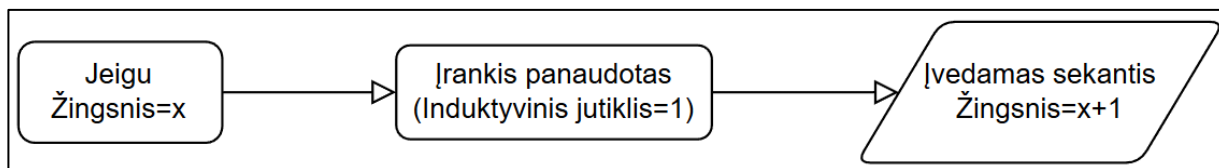
Pirmoje darbo pozicijoje atliekamas detalės įdėjimas, ją pozicionuojant taip, kad vėlesnėse operacijose būtų patogų prisukti plastikinį dangtelį ir stebulę prie variklio veleno. Įdėjimo metu variklio veleno galas turi būti pasuktas ir įstatytas tik viena kryptimi – ta, kuri leidžia vėliau patogiai prisukti varžtą veleno fiksacijai.

Pilnai įstačius detalę, apatinėje dalyje keturi induktyviniai jutikliai stebi pirmoje įrangoje susuktus varžtus (žr. 15 pav.). Šioje pozicijoje detalę praktiškai galima įdėti dvejomis kryptimis, todėl, siekiant išvengti klaidingo įdėjimo, įrengtas **detalės pozicijos stebėjimas lazeriu** (žr. 19 pav.). Patikra paremta detalės nesimetriška geometrija – vienoje pusėje esančios skylės labiau išsikišusios į šoną. Įdėjus detalę teisingai, lazerio spindulys praeina šalia detalės, o įdėjus neteisingai – spindulys atsitreškia į detalę ir sistema fiksuoja klaidą.

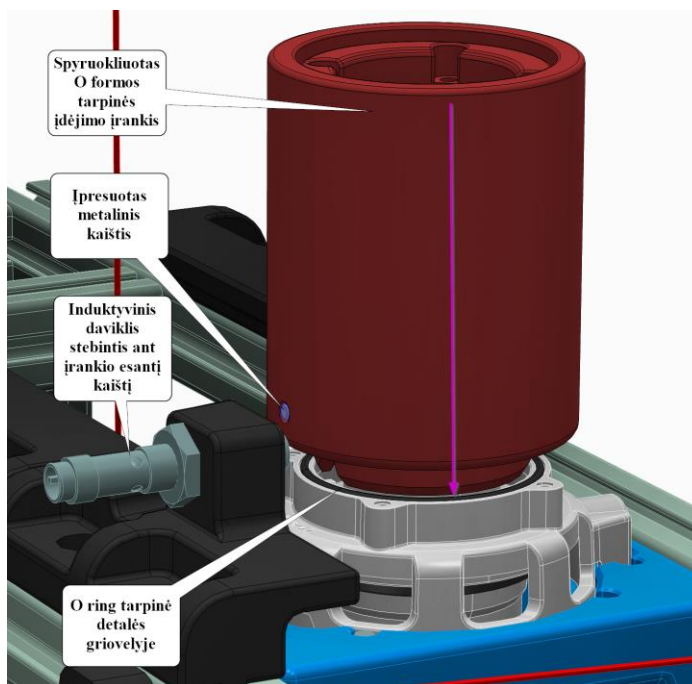


19 pav. Įsuktų varžtų patikrinimas ir teisingos krypties užtikrinimas lazeriu. Žingsnio veiksmų loginė schema

Antroje darbo pozicijoje montuojama o formos tarpinė. Gumos uždėjimui sukurtas įrankis ant kurio užsidėjus gumą, įrankį užmovus ant variklio ir prispaudus prie galo, guma pasilieka griovelyje. Tuo pačiu šioje pozicijoje yra sekamas įrankio panaudojimas, ant įrankio įpresuotas metalinis kaištis, kurį galinėje įrankio panaudojimo padėtyje induktyvinis jutiklis užfiksuoja (žr. 20 ir 21 pav.).

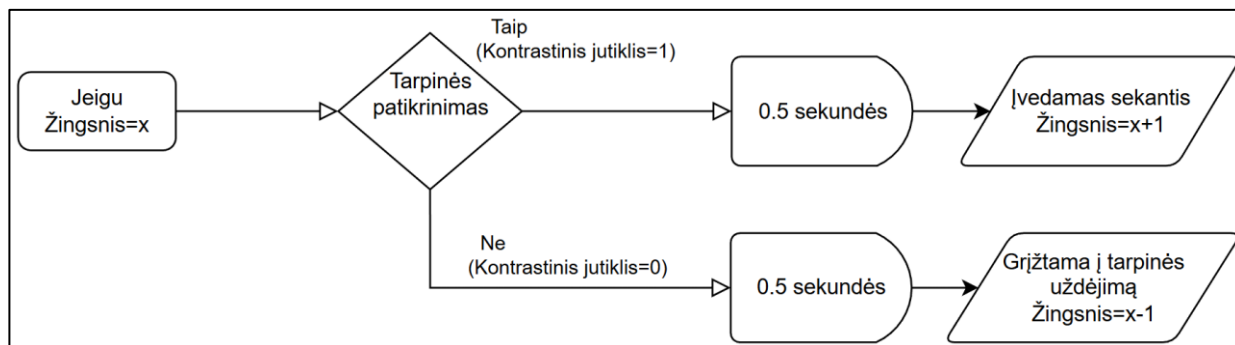


20 pav. Įrankio panaudojimo loginė schema

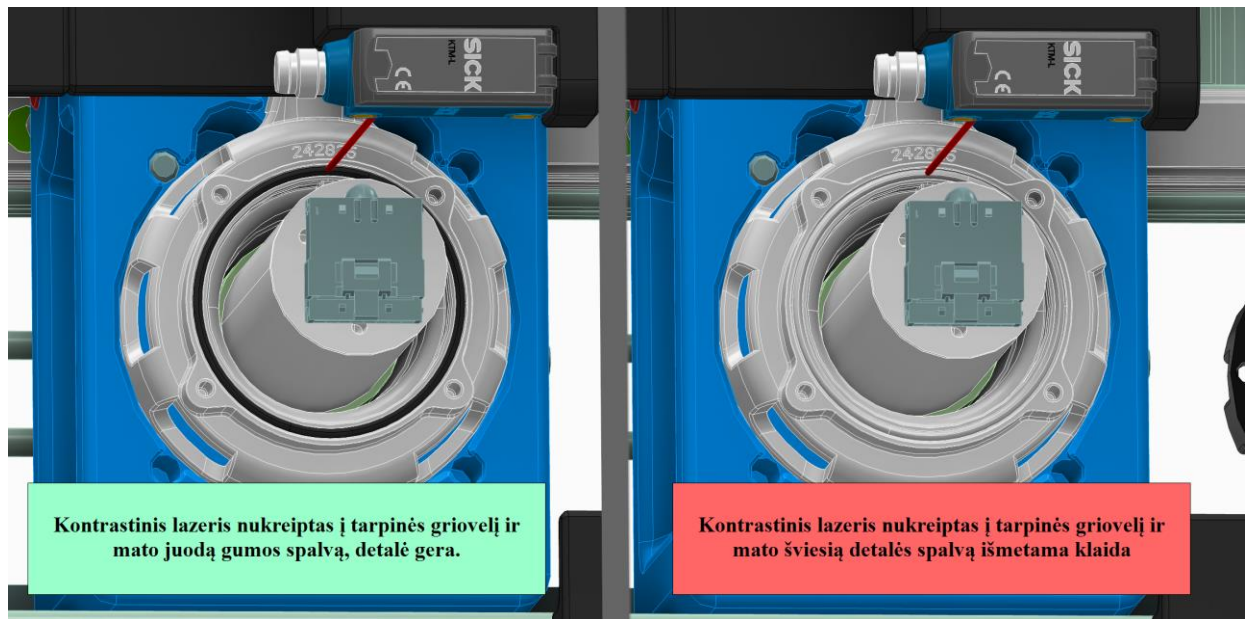


21 pav. Spyruoklinis tarpinės uždėjimo įrankis ir jo panaudojimas

Trečioje antros įrangos darbo pozicijoje vyksta, antroje darbo pozicijoje uždėtos gumos tikrinimas. Kontrolė vyksta panaudojant kontrastinį jutiklį, kuris atskiria juodą tarpinės spalvą nuo šviesios detalės spalvos(žr. 22 pav.). Lazeris nukreiptas į detalės griovelį, tokiu būdu sekama ar tarpinė surinkta ir yra vietoje (žr. 23 pav.).



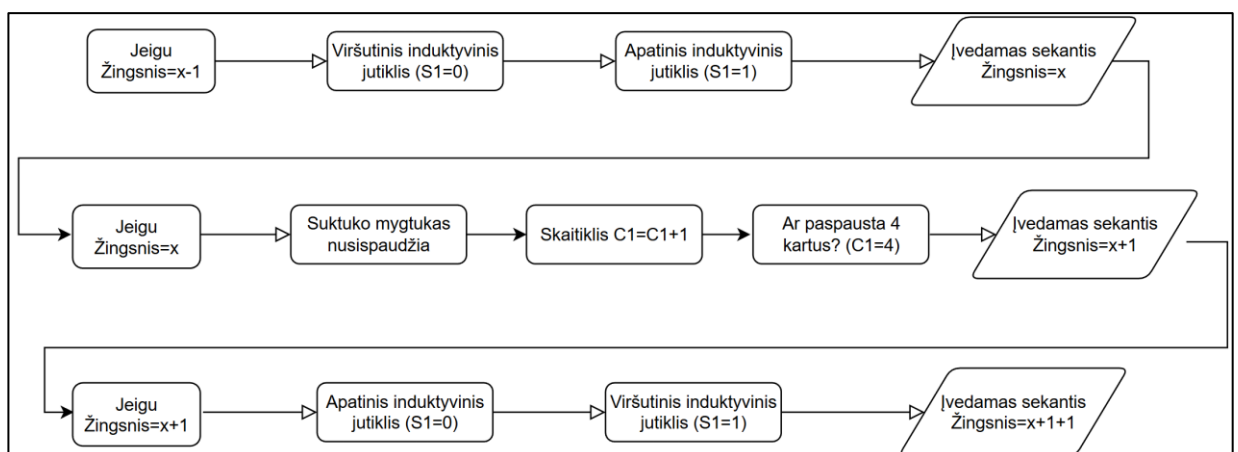
22 pav. Tarpinės tikrinimo loginė schema



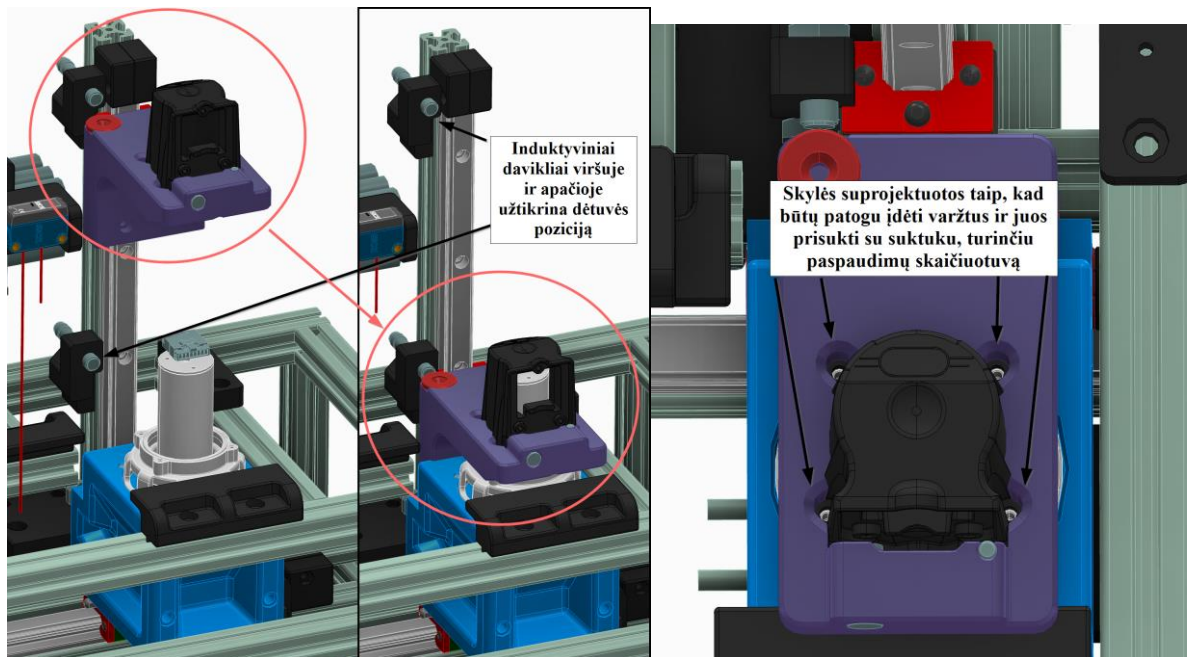
23 pav. Gumos tikrinimas kontrastiniu jutikliu nukreipiant spindulį į detalės griovelį ir žingsnio loginė schema

Ketvirtoje darbo pozicijoje atliekamas dangtelio prisukimas. Suprojektuota dangtelio dėtuovė, į kurią įdedamas dangtelis – kartu su dėtuovės judesiu jis nusileidžia ant surinkto bloko. Dėtuovės padėtį stebi integruoti induktyviniai jutikliai, todėl sistema gali sekti, kada veiksmas atliktas ir kada dar ne (žr. 25 pav.).

Siekiant darbo patogumo, suprojektuotos skylės varžteliams įdėti, kad operatoriui nereikėtų jų laikyti rankoje prisukimo metu. Prisukimui naudojamas suktukas su paspaudimų skaičiavimo funkcija, leidžiantis patikrinti ar varžtas prisuktas. Atlikus veiksmą, dėtuovė atsiskiria nuo detalės, o sistema paprašo ją pakelti – taip neužblokuojamas mazgo išėmimas ir įranga paruošiama kitam darbo ciklui (žr. 24 pav.). Dėl suktuko veikimo nestabilumo ir galimybės atlikti aklius paspaudimus, varžtų prisukimas papildomai patikrinamas kitoje įrangoje.



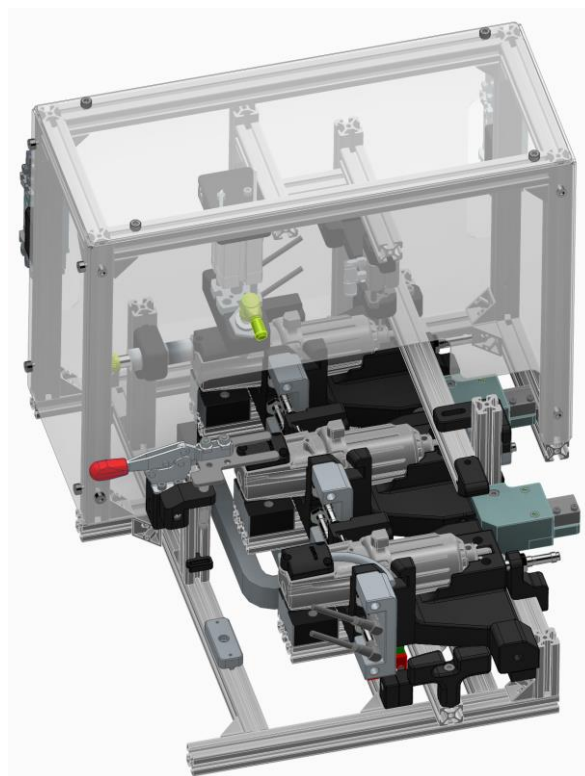
24 pav. Ketvirtos darbo pozicijos loginė schema



25 pav. Antro įrangos mazgo ketvirta darbo pozicija, dangtelio prisukimas

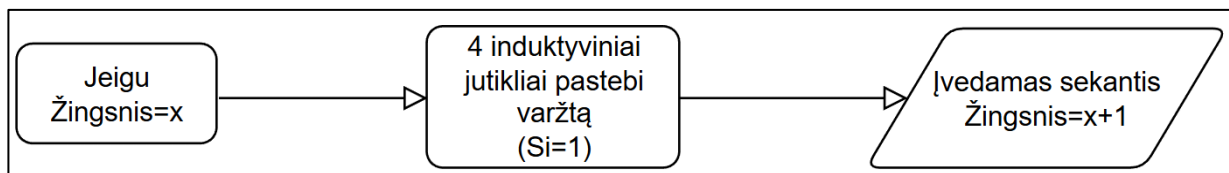
3.2.3. Įrangos trečias surinkimo mazgas

Su trečia įranga surenkama – stebulė ir laidas. Įrangą sudaro trys darbo pozicijos, stotelės, kuriose atliekami tvirtinimo, surinkimo ir kontrolės veiksmai (žr. 26 pav.). Šioje įrangoje pasikartoja tas pats, kaip ir kitose įrangose, spynų mechanizmas ir naudojamas borto sprendimas, kad detalės neišimti viduryje ciklo.

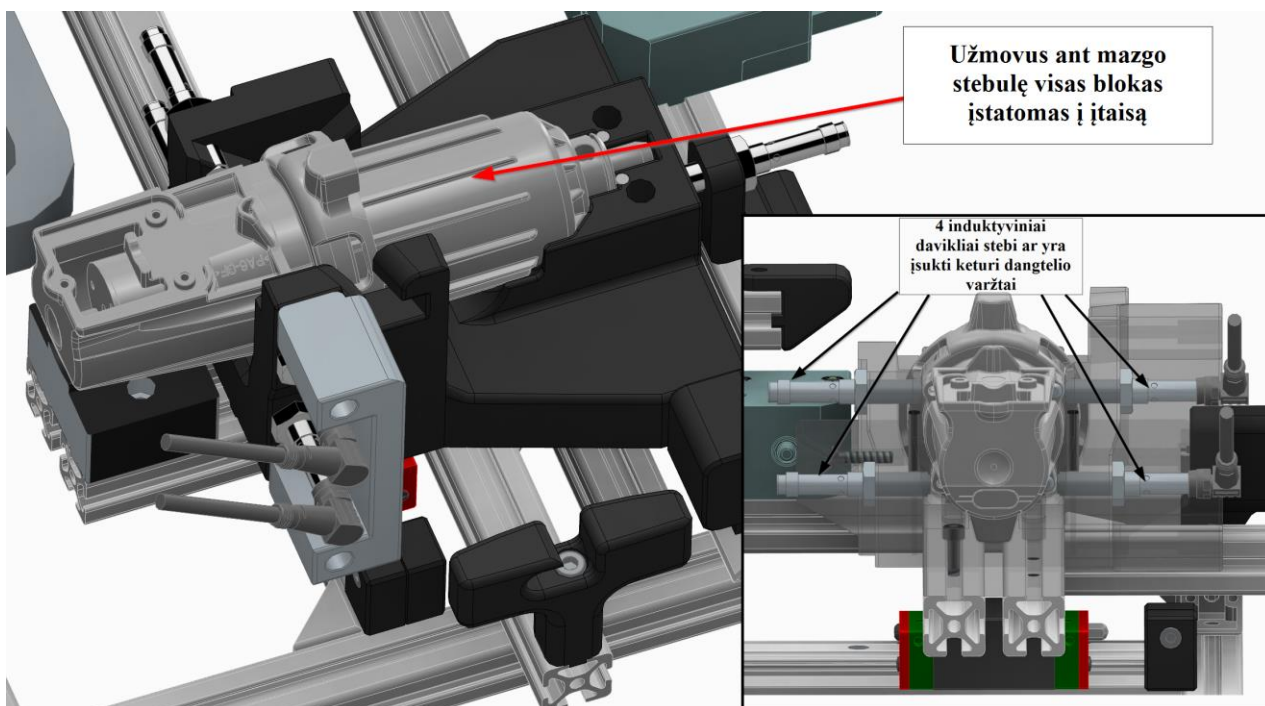


26 pav. Trečio įrangos mazgo bendras vaizdas

Prieš pradėdant pirmąją operaciją, ant, jau pirmoje ir antroje įrangoje surinkto, pavaros bloko užmaunama stebulė. Kadangi ankstesnėje operacijoje (antroje įrangoje) veleno išpjova buvo pasukta reikiama kryptimi, kad būtų patogų prisukti varžtą, šioje pozicijoje svarbu stebulės varžto skylę pasukti į viršų, kad ji sutaptų su veleno išpjova. Tuomet visas blokas įstatomas į įtaisą. Tik pilnai įstačius detalę, sistema, naudodama indukcinis jutiklius, patikrina, ar visi dangteliui skirti varžtai yra prisukti (žr. 27 ir 28 pav.)



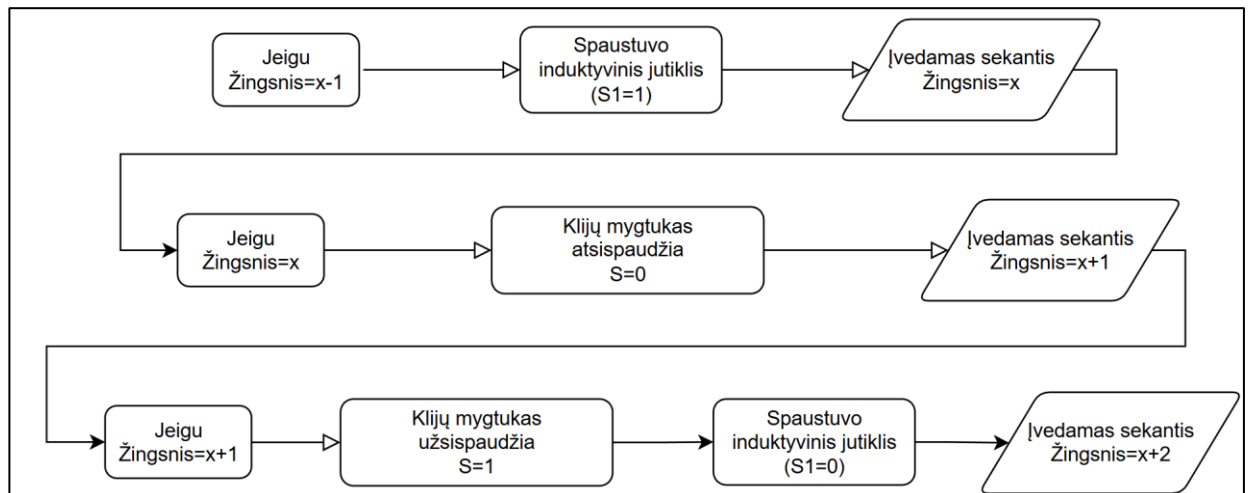
27 pav. Keturių varžtų patikrinimo loginė schema



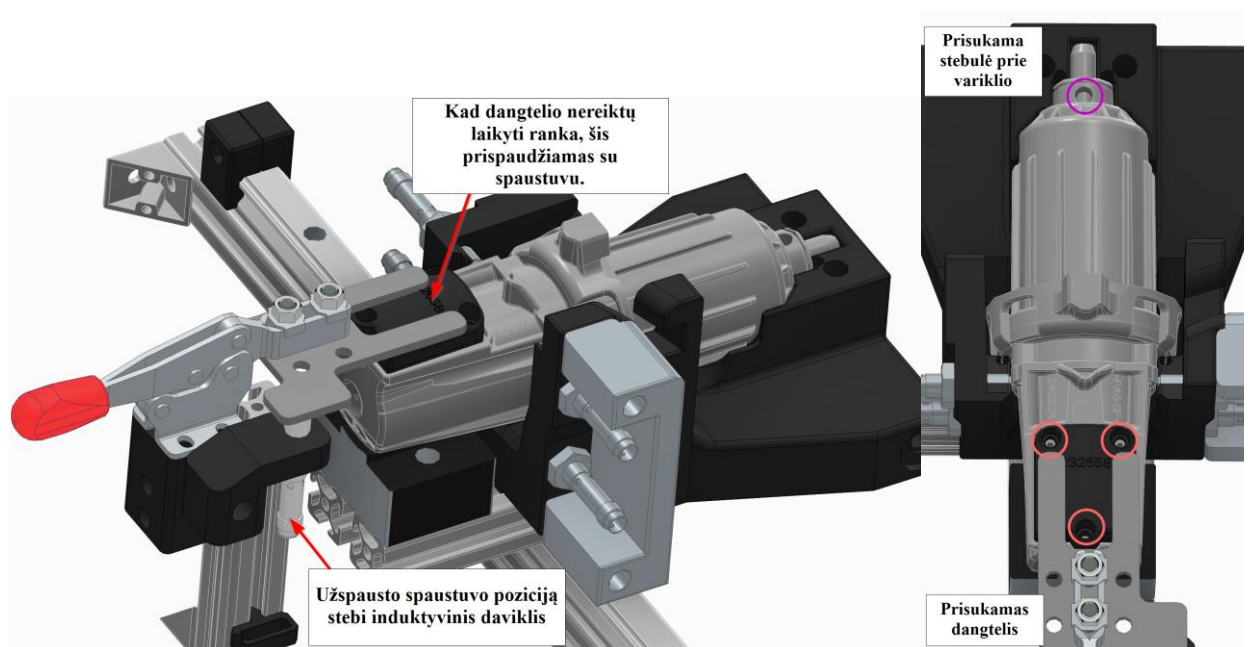
28 pav. Stebulės užmovimas ir dangtelio 4 varžtų patikrinimas

Antroje darbo pozicijoje atliekamas dangtelio su laidu pajungimas ir likusių varžtų įsukimas. Prieš uždedant dangtelį, reikia sujungti laidą su varikliu greita jungtimi. Tai atlikus, dangtelis uždedamas ant mazgo ir prispaudžiamas spaustuvu, kuris laiko dangtelį, kad šis neatšoktų. Tuo pačiu metu, atlikus užspaudimo veiksmą, induktyvinis jutiklis fiksuoja, kad spaustuvas nuspaustas – tokiu būdu sistema žino, jog veiksmas įvykdytas ir galima pereiti prie sekančių žingsnių (žr. 29 pav.).

Toliau prisukami likę varžtai: trys dangtelio surinkimo varžtai ir vienas varžtas, padengtas kljais, kuris tvirtina stebulę prie variklio veleno, kad būtų užtikrintas sukimo judesio perdavimas. Baigus operaciją, spaustuvas pakeliamas, o sistema tęsia darbo eigą (žr. 30 pav.).

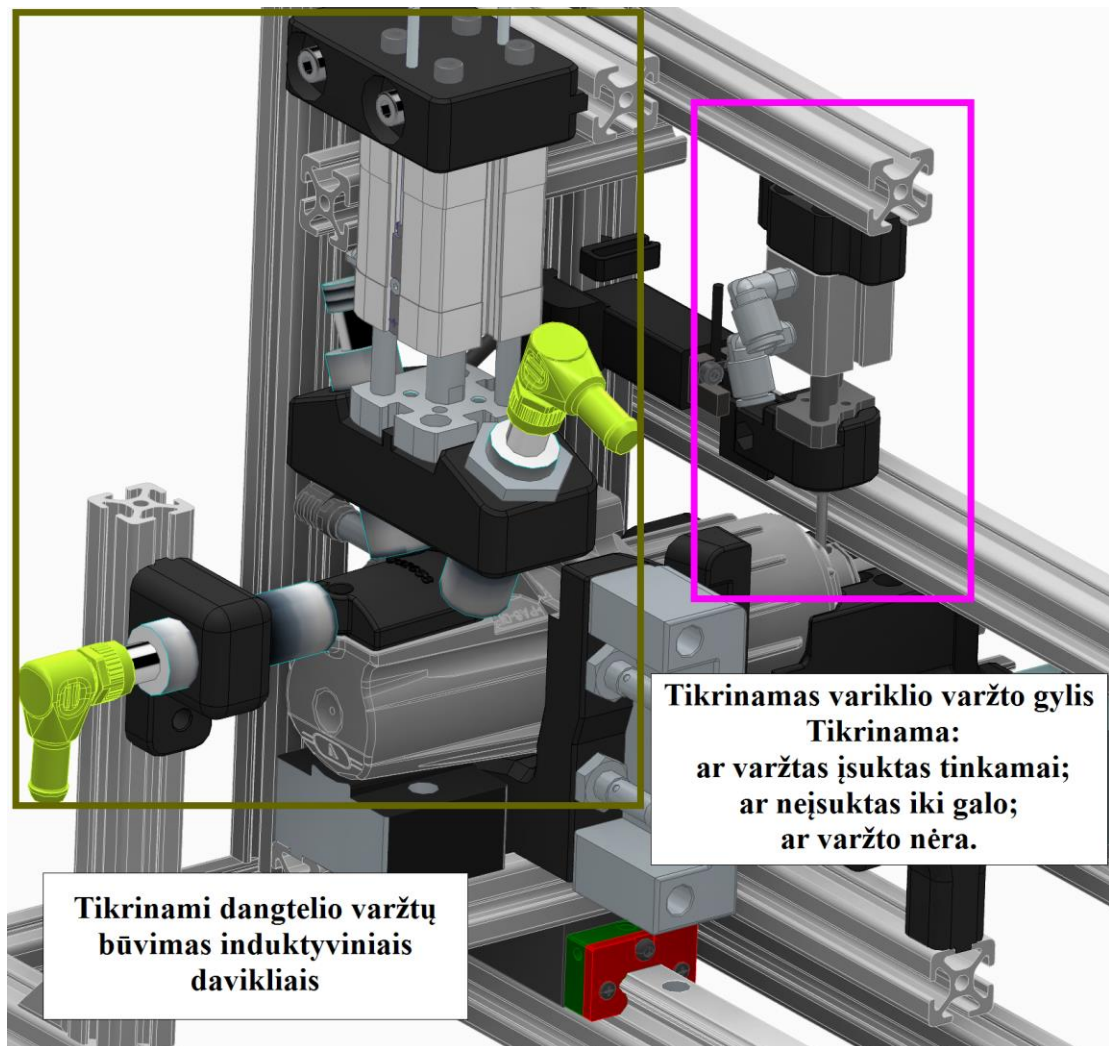


29 pav. Varžtų prisukimo loginė schema



30 pav. Antros pozicijos spaustuvo prispaudimas ir varžtų prisukimas

Trečioje darbo pozicijoje vyksta patikra, ar prieš tai trečioje įrangoje įsukti varžtai yra įsukti. Šią patikrą sudaro dviejų pozicijų varžtų patikra. Vienoje tikrinami varžtai ar buvo prisuktas dangtelis. Kitoje pozicijoje tikrinama ar įsuktas ir ar tinkamai įsuktas veleno tvirtinimo varžtas. Šios dvi patikros vyksta paeiliui (žr. 31 pav.).

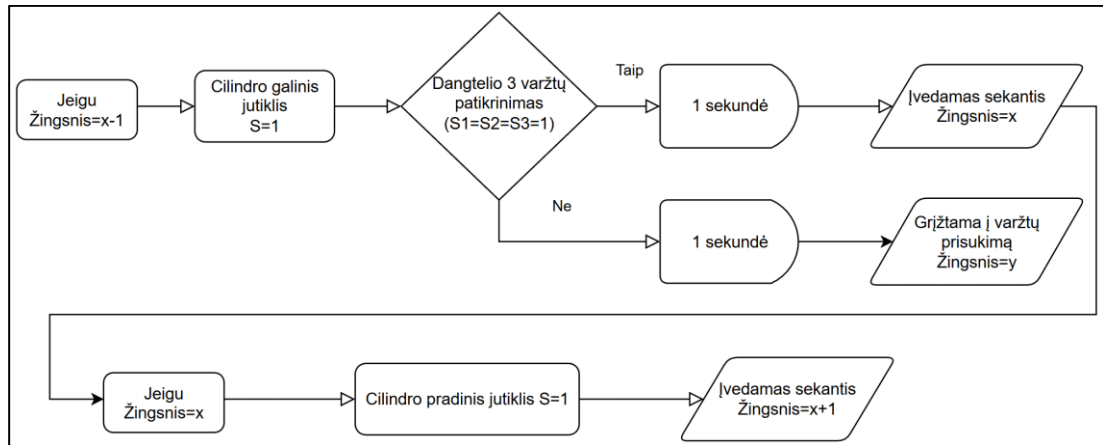


31 pav. Paskutinių varžtų patikrinimas

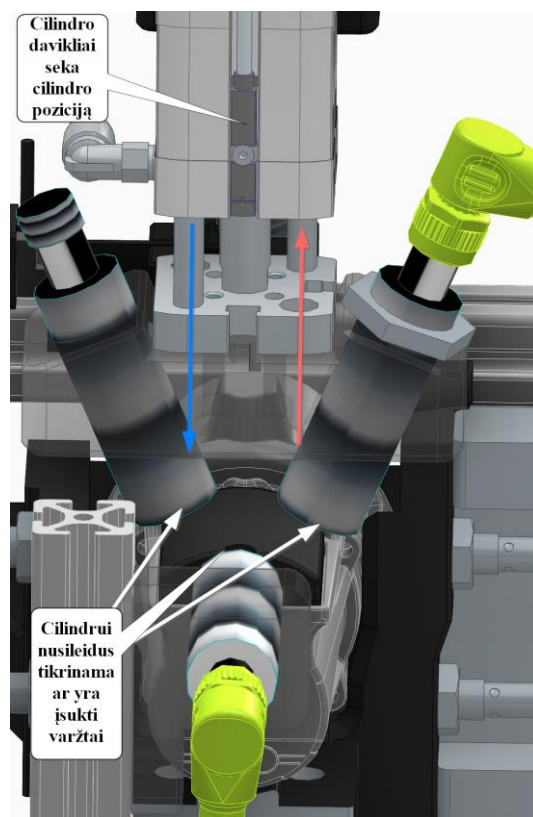
Dangtelio varžtų patikrinimui naudojamas pneumatinis cilindras ir induktyviniai jutikliai. Cilindras panaudotas todėl, kad dangtelio paviršius yra išlenktas, o induktyvinius jutiklius reikia priartinti labai arti detalės. Jei jutikliai būtų pritvirtinti nejudamai, detalės nebūtų galima pastumti linijine karietos kryptimi tarp darbo pozicijų, nes jie kliudytų dangteliui. Kadangi varžtai dangtelyje yra įleisti gana giliai, naudojami galingesni induktyviniai jutikliai, veikiantys iš didesnio atstumo, kad būtų galima patikimai juos užfiksuoti. Konstrukcijoje įrengti trys jutikliai po vieną kiekvienam varžtui. Du induktyviniai jutikliai pritvirtinti prie cilindro, o vienas prie konstrukcijos galo (žr. 32 ir 33 pav.).

Siekiant užtikrinti sistemos saugumą ir cilindro veikimo kontrolę, papildomai sumontuoti du padėties jutikliai, sekantys cilindro pradinę ir galinę padėtį. Įvykus varžtų patikrinimui, cilindras atsitraukia ir procesas tęsiasi toliau. Jei fiksuojama, kad kuris nors varžtas neprisuktas ar jutiklis nesuveikė, sistema grąžina veiksmą pakartojimui. Jei viskas patikrinta sėkmingai – pereinama prie veleno varžto tikrinimo.

Cilindrų valdymas, kaip ir spynų valdymas, yra susietas su atitinkamu proceso žingsniu. Kai sistema pasiekia žingsnį, prie kurio priskirtas konkretaus cilindro nuleidimas, įsijungia to cilindro vožtuvo valdymo signalas. Tokiu būdu cilindras suleidžiamas tik tada, kai vykdomas jam numatytas žingsnis. Cilindrų valdymo loginė schema pavaizduota 9 paveikslėlyje.



32 pav. Varžtų tikrinimo trejais induktyviniais jutikliais loginė schema



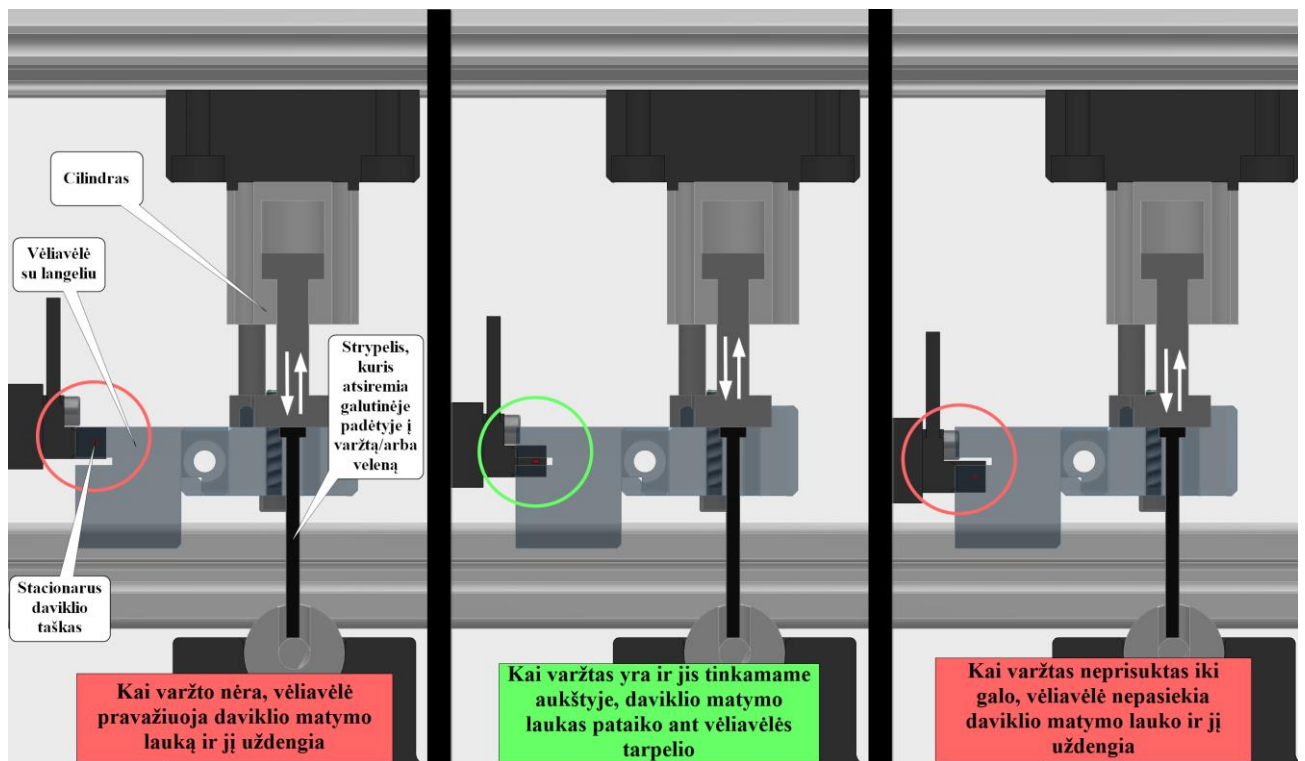
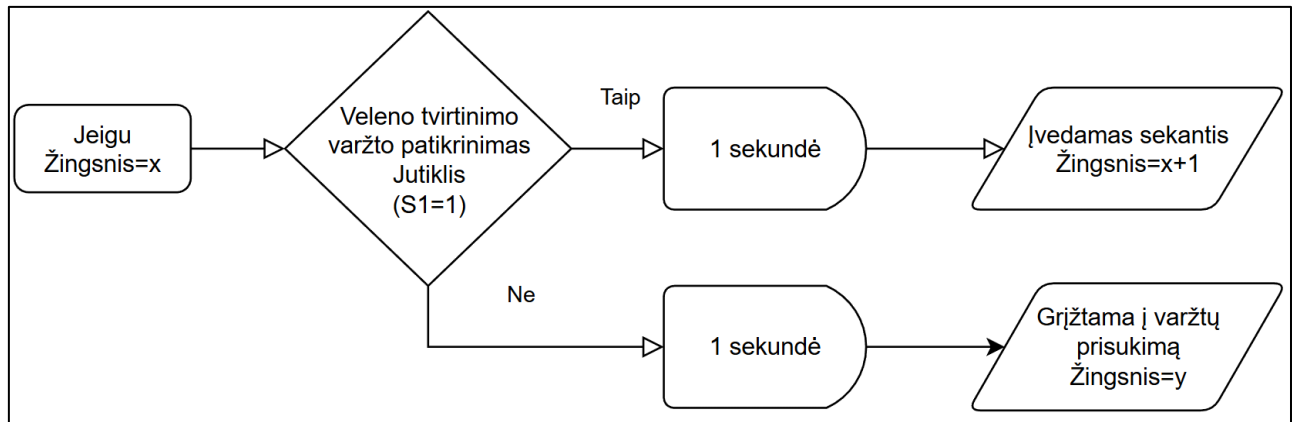
33 pav. Dangtelio su laidu varžtų patikrinimas induktyviniais jutikliais

Veleno tvirtinimo varžto patikrinimui pritaikytas vėliavėlės ir jutiklio principas, kombinuotas su cilindru. Patikros veikimo principas toks: prie cilindro pritvirtinta vėliavėlė su 1,55 mm pločio langeliu, o šalia jos – strypelis, kuris nusileisdamas atsiremia į varžtą. Prie konstrukcijos stacionariai pritvirtintas jutiklis, kuris stebi vėliavėlės langelio padėtį (žr. 34 pav.).

Cilindrai leidžiantis žemyn, strypelis atsiremia į varžtą ir sustoja tam tikrame aukštyje. Jutiklis nustatytas taip, kad esant tinkamai įsuktam varžtui, vėliavėlės langelis sustotų tiesiai jutiklio matymo lauke – tokiu atveju jutiklis suveikia ir sistema patvirtina, kad varžtas yra prisuktas.

Jei varžto nėra, strypelis leidžiasi giliau nei reikia ir jutiklis mato ne langelį, o vėliavėlės sienelę, todėl nesuveikia. Kitu atveju, kai varžtas neprisuktas iki galo, strypelis sustoja aukščiau – langelis lieka virš jutiklio ir šis vėl mato sienelę. Tokiu būdu sistema fiksuoja klaidą. Užfiksavus klaidą, sistema

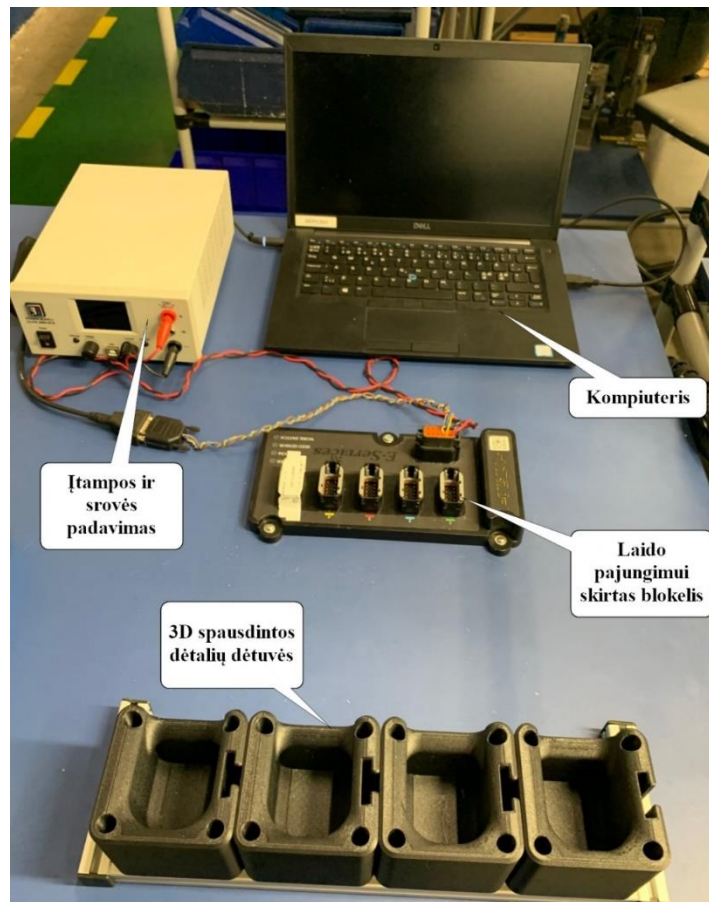
leidžia pakartoti veiksmą ir prisukti trūkstamus varžtus, po to patikra atliekama dar kartą. Jei klaida išlieka, fiksuojamas brokas ir leidžiama detalę išimti apžiūrai. Kitu atveju, kai patikrinimas sėkmingas, sistema patvirtina, kad detalė gera ir leidžia išimti surinktą mazgą bei tęsti proceso eigą.



34 pav. Varžto patikrinimo principas, paremtas vėliavėlės, strypelio ir cilindro kombinacija ir jo loginė schema:

1 – varžto nėra; 2 – varžtas prisuktas teisingai; 3 – varžtas neprisuktas iki galo

Paskutinis žingsnis, nors ir atliekamas atskirai nuo pagrindinės įrangos, yra vienas svarbiausių – variklių veikimo patikrinimas. Testavimo įranga veikia taip: sujungus pavaros laidus į pajungimo blokelį ir per kompiuterį paspaudus testavimo mygtuką, varikliams paduodama reikalinga srovė ir įtampa (žr. 35 pav.). Kompiuteris parodo sukimosi greitį bei srovės reikšmę, o jei variklis neveikia ar yra brokuotas – išmeta klaidos pranešimą.



35 pav. Pavaros variklio ir jungties patikrinimas

Šis testas atliekamas siekiant patikrinti, ar pavara veikia tinkamai, ar laidas ir dangtelis nėra pažeisti, bei ar jungtis tarp variklio ir laido buvo atlikta teisingai surinkimo metu. Tokiu būdu galima nustatyti ar laidas nėra brokuotas ir ar pats variklis yra pilnai veikiantis.

3.3. Siūloma loginė seka

Siūloma loginė surinkimo seka sukurta taip, kad operatorius būtų vedamas per visus kritinius surinkimo veiksmus nuosekliai ir be galimybės praleisti ar atlikti veiksmus neteisinga tvarka. Sistema paremta *Poka-Yoke* principu – kiekvienas žingsnis patvirtinamas tik tada, kai įvykdomos visos reikalaujamos loginės ir fizinės sąlygos. Visų surinkimo įrangų spynos yra tiesiogiai susietos su atitinkamais proceso žingsniais. Kiekvienas spynos cilindras *PLC* ir vožtuvais valdomas taip, kad būtų atidaromas tik tada, kai žingsnyje reikia perstumti mazgą, o atliekant surinkimo operacijas – automatiškai užrakinamas. Tokia spynų valdymo logika užtikrina teisingą mazgo eiliškumą, eliminuoja neteisingus operatoriaus veiksmus ir veikia, kaip *Poka-Yoke* metodas, verčiantis sekti surinkimo eiliškumą.

Pirmosios įrangos loginė seka sudaryta taip, kad operatorius būtų nuosekliai vedamas per visas pradinio mazgo paruošimo operacijas – nuo detalių įdėjimo iki klijų paėmimo, varžtų prisukimo, gumos montavimo ir patikrinimo. Tokia struktūra eliminuoja žmogiškojo faktoriaus įtaką ir užtikrina, kad jokia operacija nebūtų atlikta neteisinga tvarka (žr. 4 lentelę). Veiksmų seka paveikslėliu pateikta 1 priede.

4 lentelė. Pirmos įrangos loginės sekos žingsniai

Žingsnis	Spynų būseną	Surinkimo operacija	Fiksuojantis veiksnys / jutiklis	Pastabos / loginė sąlyga
1	Užrakinta	1 poz. variklio ir 4 poz. detalės įdėjimas	Nusispaudžia mygtukas	Užfiksuojama, kad detalės įdėtos
2	Atrakinta	Laukia, kol mazgas bus pastumtas į 2 darbo poziciją	2 darbo pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina, kad mazgas perstumtas
3	Užrakinta	Laukia kol bus paimti klijai „Loctite 243“	Klijų mygtuko atsijungimas	Užfiksuojama klijų paėmimo pradžia
4	-	Sukimas – 4 varžtai prisukami su suktuku	Sukimo mygtukas nuspaustas 4 kartus	Fiksuojamas kiekvienas paspaudimas
5	-	Klijų padėjimas į vietą	Klijų mygtukas nusispaudžia	Patvirtina klijų padėjimą
6	Atrakinta	Laukia kol mazgas pastumiamas į 3 poziciją	3 pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą
7	Užrakinta	Vykdomas gumos uždėjimas ir užspaudimas spaustuviu	U formos viršutinis ir apatinis foto jutikliai	Prispaudimo metu viršutinis suveikia, apatinis atsijungia
8	-	Gumos prispaudimo mechanizmo pakėlimas	U formos viršutinis ir apatinis foto jutikliai	Apatinis suveikia, viršutinis atsijungia
9	-	Gumos pozicijos patikrinimas	Lazerinis jutiklis	Jei lazeris aptinka kliūtį – guma uždėta gerai; jei ne – kartojamas 6 žingsnis
10	Atrakinta	Laukia kol mazgas grįš į pradinę (1) poziciją	1 pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina grįžimą į pradžią
11	Užrakinta	Mazgas išimamas	Mygtukas atsijungia	Surinktas mazgas I paruoštas išėmimui

Antroji surinkimo įranga skirta atlikti O formos tarpinės montavimą, jos patikrą ir detalės prisukimą, todėl jos loginė seka orientuota į tarpinės patikrinimo veiksmus ir detalės prisukimą. Siekiama užtikrinti, kad tarpinė ir detalė būtų surinktos ir neįmanoma būtų tęsti darbo, jeigu kuris nors etapas atliktas neteisingai. Valdymo logika paremta nuosekliais įtaiso perstūmimais tarp keturių darbo pozicijų ir jutiklių grįžtamuoju ryšiu (žr. 5 lentelę). Veiksmų seka paveikslėliu pateikta 2 priede.

5 lentelė. Antros įrangos loginės sekos žingsniai

Žingsnis	Spynų būseną	Surinkimo operacija	Fiksuojantis veiksnys / jutiklis	Pastabos / loginė sąlyga
1	Užrakinta	Surinkto mazgo I įdėjimas ir 4 varžtų (9 poz.) patikrinimas	4 induktyviniai varžtų tikrinimo jutikliai, lazerinis jutiklis	Patvirtina, kad visi varžtai prisukti ir mazgas įdėtas teisingai
2	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 2 poziciją	2 darbo pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą
3	Užrakinta	Tarpinės O-ring (2 poz.) įdėjimas, įrankio panaudojimas	Įrankio induktyvinis jutiklis	Užfiksuojamas įrankio veikimas ir tarpinės įdėjimas

Žingsnis	Spynų būseną	Surinkimo operacija	Fiksuojantis veiksnys / jutiklis	Pastabos / loginė sąlyga
4	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 3 poziciją	3 darbo pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą
5	Užrakinta	Tarpinės (2 poz.) patikrinimas	Kontrastinis jutiklis (gumos buvimas)	Jeigu yra = 1 – keliauja toliau į 6 žingsnį; jei nėra = 0 – grąžina į 3 žingsnį (pakartotinis tarpinės įdėjimas)
6	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 4 poziciją	4 darbo pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą
7	Užrakinta	Detalės (3 poz.) įdėjimas į dėtuve, dėtuve privedimas prie mazgo	Viršutinis dėtuve induktyvinis jutiklis = 0, apatinis = 1	Patvirtina, kad dėtuve nuleista ir detalė uždėta
8	-	Detalės (3 poz.) prisukimas su 4 varžtais (10 poz.)	Mygtukas nuspaustas 4 kartus	Fiksuojamas kiekvienas prisukimo paspaudimas
9	-	Detalės dėtuve pakėlimas į viršų	Viršutinis dėtuve induktyvinis jutiklis = 1, apatinis = 0	Patvirtina, kad dėtuve pakelta ir mazgas atlaisvintas
10	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 1 poziciją	1 darbo pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą į pradinę padėtį
11	Užrakinta	Surinkto mazgo II išėmimas	4 induktyviniai jutikliai = 0	Užfiksuoja, kad mazgas išimtas ir ciklas baigtas

Antros įrangos loginė seka eliminuoja kritines rizikas, patikrina ar prisukti visi varžtai, seka ar įdėta o formos tarpinė. Jutiklių kombinacija užtikrina, kad mazgas pereina tik tada, kai yra visiškai paruoštas tolimesniam surinkimui, todėl ženkliai sumažinama broko tikimybė ir užtikrinama maksimali surinkimo kokybė.

Trečioji įranga vykdo paskutinę surinkimo operaciją, orientuotą į laido su dangteliu uždėjimą, klijų panaudojimą, kelių detalių prisukimą ir galutinę varžtų prisukimo kontrolę. Tai sudėtingiausias modulis dėl to, kad jame naudojami keli skirtingi tikrinimo mechanizmai: induktyviniai, U tipo jutikliai ir cilindras, ir jo jutikliai. Šiame etape priimamas sprendimas, ar mazgas laikomas tinkamu galutinei komplektacijai (žr. 6 lentelę).

6 lentelė. Trečios įrangos loginės sekos žingsniai

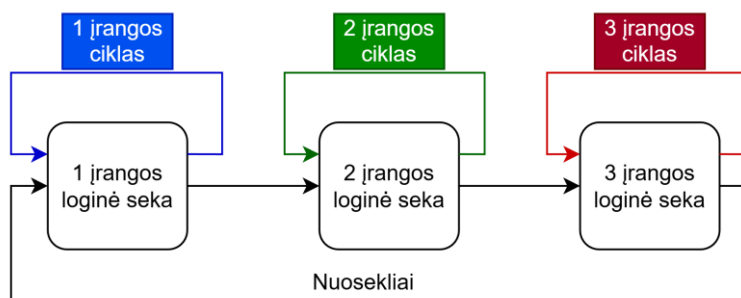
Žingsnis	Spynų būseną	Surinkimo operacija	Fiksuojantis veiksnys / jutiklis	Pastabos / loginė sąlyga
1	Užrakinta	Surinkto mazgo II kartu su 6 poz. detale įdėjimas į įtaisą	4 induktyviniai jutikliai (10 poz. varžtų tikrinimas) = 1	Patvirtina, kad visi varžtai prisukti ir mazgas įdėtas teisingai
2	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 2 poziciją	2 pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstūmimą
3	Užrakinta	Laido (5 poz.) uždėjimas ir prispaudimas spaustuviu	Spaustuvo induktyvinis jutiklis = 1	Patvirtina, kad spaustuvas nuspaustas ir laidas uždėtas
4	-	Klijų Loctite 243 paėmimas	Klijų mygtukas = 0	Užfiksuojamas klijų paėmimo momentas

Žingsnis	Spynų būseną	Surinkimo operacija	Fiksuojantis veiksnys / jutiklis	Pastabos / loginė sąlyga
5	-	Laido (5 poz.) prisukimas su 10 poz. varžtais, klijų panaudojimas ir detalės (6 poz.) prisukimas su 8 poz. varžtais	Spaustuvo induktyvinis jutiklis = 0, klijų mygtukas = 1	Patvirtina, kad klijai panaudoti ir prisukimas baigtas
6	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 3 poziciją	3 pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina perstumimą
7	Užrakinta	Dangtelio (10 poz.) trijų varžtų patikrinimas cilindru	3 induktyviniai jutikliai (cilindre)	Jei visi = 1 – pereina į 8 žingsnį; jei kuris nors = 0 – atsirakina ir grįžta į 3 žingsnį
8	-	Veleno varžto (8 poz.) patikrinimas su vėliavėlės mechanizmu	U tipo jutiklis	Jei U tipo jutiklis = 1 – pereina į 9 žingsnį; jei = 0 – atsirakina ir grįžta į 3 žingsnį
9	Atrakinta	Laukia, kol įtaisas pastumiamas į 1 poziciją	1 pozicijos induktyvinis jutiklis	Patvirtina grįžimą į pradinę padėtį
10	Užrakinta	Surinktos detalės išėmimas	4 induktyviniai jutikliai (10 poz. varžtų tikrinimas) = 0	Patvirtina, kad mazgas išimtas ir ciklas baigtas

Apibendrinant, trečioji įranga užtikrina, kad prieš išimant galutinį mazgą būtų patikrintos visos mechaninės jungtys, klijų panaudojimas ir varžtų būklė. Tai pašalina riziką, kad mazgas būtų perduotas toliau su neužfiksuotais varžtais, nepanaudotais klijais ar neteisingai pritvirtintomis detalėmis.

Visa surinkimo sistema suprogramuota taip, kad trys įrangos loginės sekos veiktų nuosekliai viena po kitos. Kiekviena įranga turi savo atskirą žingsnių seką, tačiau jos visos tarpusavyje apjungtos į vieną bendrą loginę eigą – mazgas pereina į kitą įrangą tik tada, kai žingsniai baigti praeitoje loginėje sekoje.

Sistema taip pat turi galimybę paleisti bet kurią įrangą atskirai, t. y. dirbti tik su vienos įrangos žingsnių seka. Tai naudinga, kai reikia atlikti derinimą, testavimą ar pavienes operacijas, nes nereikia kartoti viso, trijų įrangų, ciklo (žr. 36 pav.).



36 pav. Nuosekli surinkimo proceso loginė schema ir trijų įrangų veikimo ciklai

Apibendrinant, visų trijų įrangų loginės sekos ir jų tarpusavio sąsajos suformuoja stabilų ir aiškiai valdomą surinkimo procesą, kuriame kiekvienas žingsnis vykdomas tik esant teisingoms jutiklių ar

atliktų veiksmų būsenoms. Toks principas užtikrina nuoseklų darbą tarp visų įrangų, eliminuoja operatoriaus klaidas ir leidžia palaikyti aukštą surinkimo kokybę viso ciklo metu.

3.4. Programos valdymas ir darbo instrukcija *HMI* ekrane

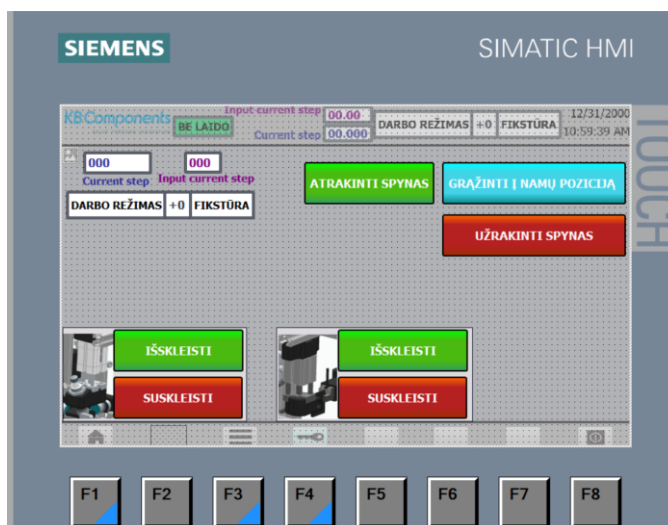
Kadangi paprastai užprogramuotas *PLC* blokas nesuteiktų aiškos darbo pradžios, eigos ar veiksmų eiliškumo, buvo integruotas *HMI* ekranas, tiesiogiai susietas su *PLC* programa. Jis leidžia patogiau sekti procesą ir tuo pačiu palengvina darbuotojo darbą. *HMI* programuojamas kartu su *PLC*, o abiejų dalių tarpusavio ryšiai užtikrina, kad ekrane realiu laiku būtų rodoma aktuali informacija.

Pagrindinė *HMI* paskirtis – padėti darbuotojui lengvai susigaudyti darbo eigoje. Ekrane dinamiškai keičiasi darbo instrukcijos, žingsnis po žingsnio nurodoma, kokį veiksmą šiuo metu prašo atlikti įranga ir kuri operacija yra aktyvi. Kad instrukcijos būtų aiškos ir vizualiai informatyvios, *Siemens TIA Portal* aplinkoje buvo parengtos 35 atskiros vizualizacijos. Jos parodo, ką konkrečiu momentu reikia atlikti, informuoja apie aptiktą klaidą arba prašo pakartoti atliktą veiksmą (žr. 37 pav.).



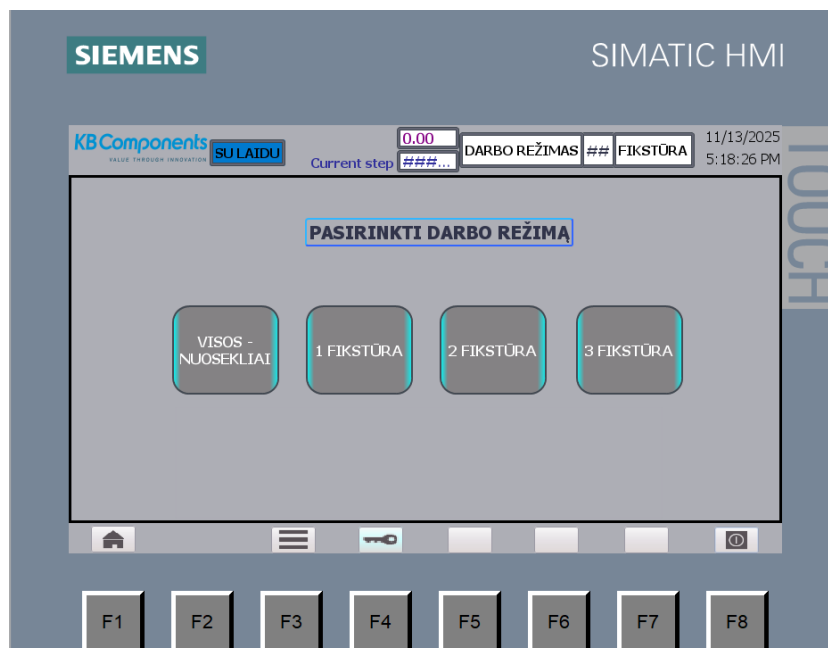
37 pav. HMI ekrano būsenos: A – instrukcija, B – klaida, C – pakartojimas

Be darbo instrukcijų, *HMI* ekranas naudojamas parametrų keitimui, įrangos testavimui, remonto funkcijoms ir darbo režimo perjungimui (žr. 38 pav.). Taip paliekama galimybė greitai reaguoti į susiklosčiusias situacijas. Pavyzdžiui, jei užstringa detalė, darbuotojas gali prisijungti prie nustatymų skilties ir nuspaudus mygtuką atrakinti reikiamas spynas.



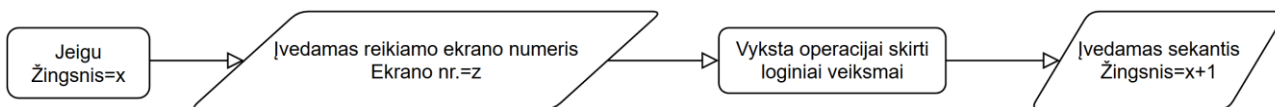
38 pav. HMI ekranas skirtas sistemos rankiniam valdymui

Programoje taip pat sukurta galimybė pasirinkti, su kuria konkrečia įranga norima dirbti (žr. 39 pav.). Ši funkcija naudinga, jei dėl tam tikrų priežasčių reikia eksploatuoti tik vieną įrangą. Pavyzdžiui, sugedus antrajai įrangai, galima perjungti darbą į pirmąją ir toliau surinkinėti detales bei sukaupti reikiamą pirmojo bloko gaminių kiekį.



39 pav. Ekranas skirtas pasirinkti darbo režimą

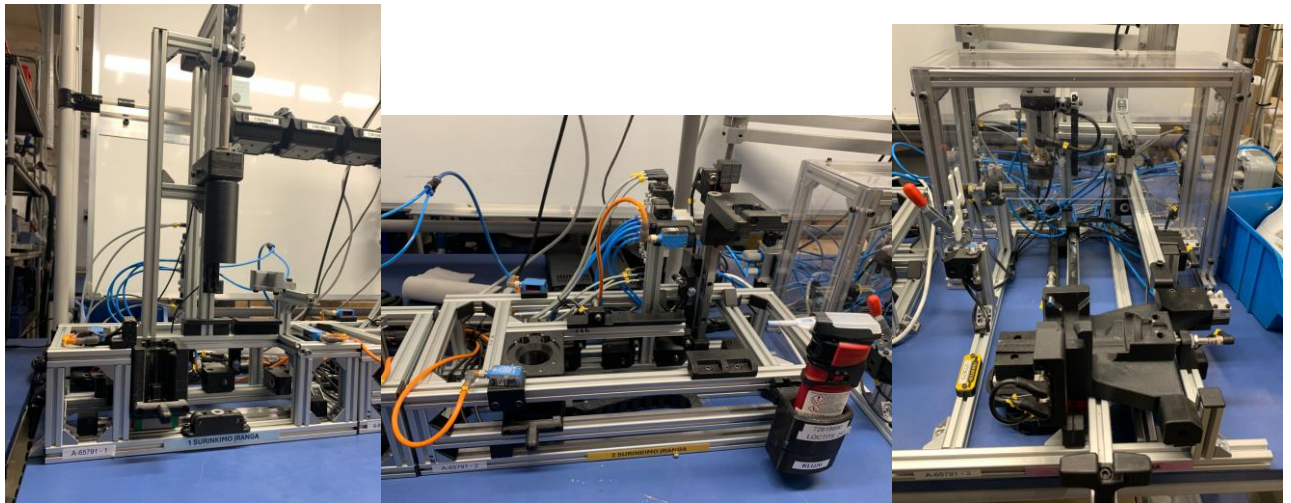
Ekranų vaizdai keičiasi realiuoju laiku. Kiekviena vizualizacija, kiekvienas ekranas turi savo numerį. Kai prasideda nauja operacija ir pasikeičia žingsnis, programoje įvedamas naujas ekranų numeris, kuris tiksliai atitinka aktyvios operacijos vizualizaciją. Šis numeris sistemoje naudojamas, kaip koeficientas, pagal kurį *HMI* pasirenka, kokį vaizdą turi rodyti. Keičiantis žingsniui, įvedama kita koeficiento reikšmė, todėl *HMI* realiu laiku užkrauna naują ekraną (žr. 40 pav.). Tai leidžia darbuotojui matyti tik tą informaciją, kuri aktuali konkrečiai operacijai, ir aiškiai suprasti, kokio veiksmo iš jo prašoma.



40 pav. Ekranų keitimas programoje

3.5. Eksperimentinis vertinimas ir surinkimo proceso duomenų pateikimas

Pilnai surinkus pirmąją, antrąją ir trečiąją įrangą, jos išdėstomos viena greta kitos, sudarant nuoseklų viso surinkimo proceso grandinę. Tokia įrangos konfigūracija leidžia vykdyti visas reikalingas operacijas paeiliui – nuo pradinio mazgo paruošimo iki galutinio variklio surinkimo ir tikrinimo. Žemiau pateikiama realios, surinktos ir veikimui paruoštos įrangos nuotrauka (žr. 41 pav.).



41 pav. Surinktos darbo vietos vaizdas. a – įrangos pirmas mazgas, b – įrangos antras mazgas, c – įrangos trečias mazgas

Įdiegus įrangą būtina atlikti eksperimentą, kurio metu įvertinama ciklo trukmė ir atliekamas *FMEA* vertinimas naujai įrangai. Šie duomenys yra naudojami lyginimui su rankinio proceso rezultatais, siekiant įvertinti projekto tikslų įgyvendinimą ir patikrinti hipotezę – ar įdiegta įranga padeda išvengti surinkimo klaidų. Tokiu būdu eksperimentas leidžia objektyviai įvertinti, ar naujoji sistema patvirtina, ar paneigia pirminę projekto prielaidą.

Ciklo laiko skaičiavimui surinkimas buvo atliekamas nuosekliai, operatoriams iš eilės vykdant pirmos, antros ir trečios įrangos operacijas. Laikas buvo fiksuojamas po kiekvieno mazgo surinkimo, siekiant tiksliai įvertinti kiekvienos įrangos įtaką bendram ciklui. Eksperimente dalyvavo trys operatoriai ir buvo matuojami kelių pavarų surinkimo laikai. Eksperimento eiga buvo identiška ciklo laiko matavimams, atliktiems prieš įrangos automatizavimą, užtikrinant vienodas sąlygas abiem atvejams (žr. 7 lentelę).

7 lentelė. Surinkimo ciklo skaičiavimas po pokyčių

Operatorius	Pirmo mazgo surinkimas		Antro mazgo surinkimas		Trečio mazgo surinkimas		Bendras laikas	
	min	s	min	s	min	s	min	s
1.	0	49	0	47	1	10	2	46
2.	1	33	1	25	2	8	5	6
3.	1	42	1	2	2	30	5	14
	1	52	0	41	1	50	4	23

Rezultatai rodo, kad ciklo laiko pasiskirstymas nėra visiškai pastovus – pirmasis operatorius surinkimą atliko beveik du kartus greičiau nei kiti. Tai paaiškinama tuo, kad šis operatorius jau buvo įgudęs dirbti su įranga, o antras ir trečias operatoriai dar tik mokėsi ja naudotis.

Vertinant antrojo ir trečiojo operatorių rezultatus atskirai, matyti, kad jų surinkimo trukmė natūraliai buvo ilgesnė. Jų ciklai svyravo nuo 4 min. 23 s. iki 5 min. 14 s., o tai yra labai artima bendram

operacijų trukmės vidurkiui – 4 minutės 22 sekundės. Šis duomenų pasiskirstymas leidžia daryti išvadą, kad operatoriaus patirtis turi reikšmingą įtaką rezultatams, o pradedantiesiems būtinas adaptacijos laikotarpis dirbant su nauja įranga.

Ciklo laiko skaičiavimo rezultatai rodo, kad vidutiniškai surinkimas atliekamas per 4 minutes ir 22 sekundes, nepriklausomai nuo operatoriaus patirties. Tuo pačiu matomas ir maksimalus įrangos efektyvumo potencialas – 2 minutės ir 46 sekundės, pasiektas patyrusio operatoriaus. Šis laiko pasiskirstymas parodo, kad naujoji įranga leidžia atlikti operacijas įvairiais laiko intervalais, tačiau bendra tendencija išlieka teigiama ir yra matomas proceso pagreitėjimas.

Toliau atliekamas rizikų vertinimas, siekiant įvertinti ne tik proceso greitį, bet ir kokybę. Po ciklo laiko analizės pereinama prie *FMEA* duomenų vertinimo, kuris parodo, kaip įrangos diegimas sumažino žmogiškųjų klaidų riziką ir padidino proceso patikimumą.

8 lentelė. *FMEA* vertinimas po įrangos įdiegimo

Nr.	Procesas / veiksmas	Galimas gedimas	Pasekmė	S	O	D	RPN	Esamos kontrolės priemonės
1	Klijų Loctite 243 panaudojimas ant 9 poz. varžto	Klijų mygtukas ar signalas neveikia → klijai nepaimti	Varžtai be klijų, atsisuks nuo vibracijų	7	4	3	84	Klijų paėmimas/padėjimas fiksuojamas mygtuko jutikliu; sistema neleidžia pereiti į kitą žingsnį, jei signalas ≠1
2	Variklio (1 poz.) ir plastikinės detalės (4 poz.) prisukimas su 9 poz. varžtais	Neįsuktas/neaptiktas vienas iš 4 varžtų	Variklis gali atsiskirti	9	1	2	18	Fiksuojami suktuko paspaudimai sukanant varžtus. Induktyviniai jutikliai tikrina kiekvieno varžto buvimą; loginė sąlyga – leidžia tęsti tik jei visi=1
3	Gumos (7 poz.) uždėjimas ir spaudimas spaustuvu	Jutiklis klaidingai aptinka gumą. Nėra gumos.	Nesandari vieta, skysčio patekimas	7	2	3	42	U formos fotojutikliai užtikrina gumos prispaudimą; lazerinis jutiklis tikrina gumą ir jos poziciją
4	Tarpinės O-ring (2 poz.) įdėjimas	Kontrasto jutiklis neveikia.	Nesandari vieta, skysčio patekimas	7	2	2	28	Induktyvinis įrankio jutiklis + kontrastinis guminės tarpinės buvimo jutiklis; ciklas neleidžia tęsti be signalo
5	Plastikinės detalės (3 poz.) prisukimas su 10 poz. varžtais	Varžtai neįsukti. Jutiklis klaidingai aptinka varžtą.	Mazgas gali išsiardyti	6	1	1	6	Mygtukas fiksuoja kiekvieną sukimą, leidžia pereiti tik paspaudus 4 kartus. Induktyviniai jutikliai tikrina varžtų buvimą.
6	Laido (5 poz.) sujungimas su varikliu	Nesujungtas laidas	Laidas nesujungtas, variklis neveiks	8	3	5	120	Variklis ir laidas tikrinami jau surinkus detalę, panaudojant tikrinimo įrangą
7	Dangtelio (5 poz.) įsukimas trejais 10 poz. varžtais	Vienas cilindro jutiklis neveikia	Nepatvirtintas surinkimas, defektas praeina	6	1	2	12	Trijų induktyvinių jutiklių signalai privalo būti =1; klaidos atveju sistema duoda ištaisyti klaidą; jei

Nr.	Procesas / veiksmas	Galimas gedimas	Pasekmė	S	O	D	RPN	Esamos kontrolės priemonės
								klaida neišnyksta, detalė brokuojama
8	Klijų panaudojimas ant 8 poz. varžto	Klijų mygtukas ar signalas neveikia → klijai nepanaudoti	Detalė 6 poz. atsiskiria ir nebeperduoda sukimo momento	6	4	3	72	Klijų paėmimas/padėjimas fiksuojamas mygtuko jutikliu; sistema neleidžia pereiti į kitą žingsnį, jei signalas ≠1
9	Veleno varžto (8 poz.) prisukimas ir patikrinimas U tipo jutikliu	U jutiklis klaidingai veikia	Detalė 6 poz. atsiskiria ir nebeperduoda sukimo momento	9	2	2	36	U tipo jutiklis; jei signalas ≠1, PLC sustabdo ciklą
10	Surinktos detalės variklio laido ir variklio patikrinimas	Nepatikrintas variklis ir laidas	Variklis gali nukeliauti pas klientą neveikiantis	7	2	3	42	Įprogramuotas žingsnis, kuriuo metu planšetėje pasirodo priminimas pajungti detales ir prašoma paspausti mygtuką, norint tęsti surinkimą

Atlikus *FMEA* analizę po įrangos automatizavimo, matyti, kad rizikos lygis ženkliai sumažėjo, tačiau vis dar išsiskiria keli didžiausi *RPN* rodikliai, kuriems būtina skirti daugiausia dėmesio. Rizikos sunkumas (*Severity*) išlieka toks pats, nes pačios operacijos paskirtis ir gedimo pasekmės detalėje nepasikeitė – keičiamos tik priemonės, leidžiančios sumažinti tikimybę (*Occurrence*) ir neaptikimo riziką (*Detection*).

Didžiausią *RPN* vertę turi laido sujungimo su varikliu operacija (*RPN* = 120). Nors variklis yra papildomai tikrinamas funkcinio bandymo metu, pats gedimas išlieka kritinis, nes neteisingai sujungtas laidas tiesiogiai lemia neveikiantį variklį. Šioje operacijoje pavyko sumažinti gedimo tikimybę dėl įdiegto žingsnio, kuriame operatorius turi įdėti surinktą mazgą į tikrinimo įrangą ir paspausti mygtuką. Vis dėlto šio etapo kontrolė 100 % neeliminuoja žmogiškojo faktoriaus – čia vis dar daug lemia operatoriaus sąžiningumas, budrumas ir tai, ar tikrinimas bus atliktas tinkamai.

Antroje ir trečioje vietoje pagal riziką išlieka klijų nepanaudojimas ant varžtų (*RPN* = 84 ir *RPN* = 72). Sistema ekrane primena paimti klijus, jų paėmimas fiksuojamas jutikliu, tačiau pats klijų užtepimas vis tiek priklauso nuo operatoriaus. Todėl rizika sumažėja, bet neišnyksta – žmogus vis dar gali klijų nepanaudoti, net jei sistema aiškiai primena.

Paskutinė reikšminga rizika – galutinės variklio ir laido patikros praleidimas (*RPN* = 42). *HMI* ekranas tik primena operatoriui įdėti mazgą į testavimo įrangą ir atlikti patikrą, tačiau negarantuoja, kad veiksmas bus tikrai įvykdytas. Dėl to ši kontrolė vis dar iš dalies priklauso nuo operatoriaus dėmesingumo.

3.6. Rezultatų palyginamoji analizė

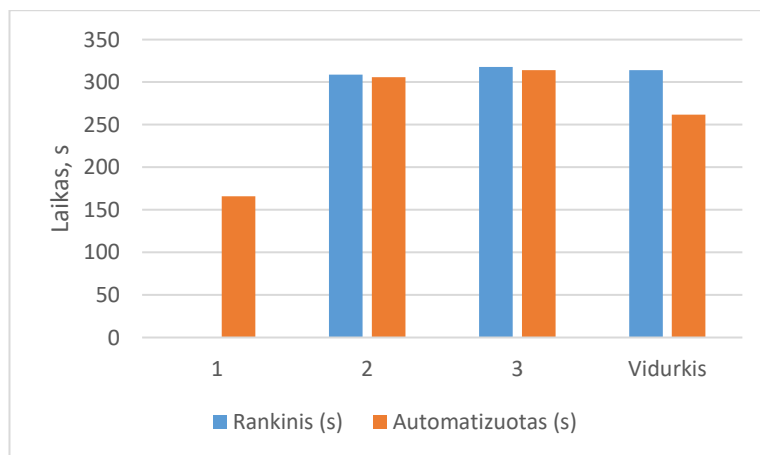
Įdiegus pusiau automatizuotą surinkimo sistemą svarbu įvertinti pokyčius pagal du pagrindinius rodiklius – ciklo laiką ir broko tikimybę. Todėl šiame poskyryje lyginami rankinio ir automatizuoto proceso ciklo laikai, pateikiamos bendros lentelės ir stulpelinės diagramos, o taip pat analizuojami *FMEA RPN* rezultatai prieš ir po pokyčių. Apžvelgiama kokios rankinio proceso rizikos buvo panaikintos, kurios išliko, tačiau tapo valdomos, ir kokios naujos techninės rizikos atsirado kartu su automatizuota įranga.

3.6.1. Palyginamoji analizė

Norint įvertinti, kokią realią naudą suteikė pusiau automatizuotos įrangos diegimas, šiame skyriuje palyginami rankinio ir automatizuoto surinkimo ciklo laikai. Abu procesai analizuojami remiantis tais pačiais trimis mazgo surinkimo etapais, o gauti duomenys išdėstyti bendroje palyginimo lentelėje (žr. 9 lentelę) ir pavaizduoti stulpeliniu grafiku (žr. 42 pav.).

9 lentelė. Prieš ir po pokyčių ciklo laikas

Operatorius	Rankinis ciklas, s	Pusiau automatizuotas ciklas, s	Skirtumas, s	Pagerėjimas (%)
1	—	166 s (2:46)		-
2	309 s (5:09)	306 s (5:06)	3	1%
3	318 s (5:18)	314 s (5:14)	4	1%
Vidurkis	314 s (5:14)	262 s (4:23)	52	16%



42 pav. Stulpelinis grafikas: ciklo laikai prieš ir po pakeitimo

Palyginus surinkimo laikus prieš ir po automatizavimo matyti, kad vertinant bendrą visų matavimų vidurkį, mazgo surinkimo ciklas sutrumpėjo 52 sekundėmis, t. y. apie 16 %. Tačiau analizuojant pavienių operatorių rezultatus, situacija kiek kitokia.

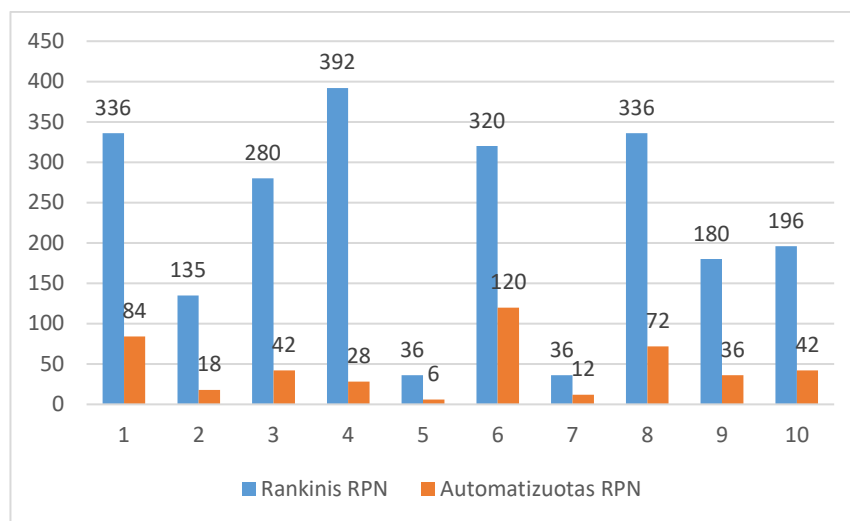
Pradžiamokslių operatorių surinkimo trukmė sumažėjo labai nedaug – vos 1 %, todėl galima teigti, kad automatizuota įranga pati savaime drastiškai nepagreitina darbo mažiau patyrusiems darbuotojams.

Geriausias rezultatas yra įgudusio operatoriaus ciklo laikas — 2 min. 46 s. Tuo tarpu kitų dviejų operatorių ciklo laikai su įranga siekė 5 min. 6 s. ir 5 min. 14 s. Tai reiškia, kad įgudęs operatorius dirbo beveik du kartus greičiau, nei mažiau patyrę kolegos. Dėl šios priežasties 2 min 46 s laikas yra laikomas maksimaliu automatizuotos įrangos potencialu — tai rezultatas, kurį galima pasiekti tik tada, kai operatorius gerai išmano įrangos logiką, valdymą ir nuoseklumą. Mažiau patyrusių operatorių laikas ženkliai ilgesnis ne dėl technologijos ribotumų, o dėl darbo su nauja įranga įgūdžių trūkumo

Norint įvertinti, kaip pusiau automatizuota įranga sumažino surinkimo proceso rizikas, buvo palygintos *FMEA* lentelės prieš ir po pokyčių (žr. 10 lentelę). Abu vertinimai sudaryti toms pačioms operacijoms, todėl galima tiksliai matyti, kurios rizikos sumažėjo labiausiai. Gauti rezultatai suvesti į bendrą palyginimo lentelę ir papildomai pavaizduoti stulpeline diagrama, kad pokyčiai būtų aiškiai matomi vizualiai (žr. 43 pav.).

10 lentelė. *FMEA RPN* rezultatai prieš ir po

Nr.	Procesas	RPN prieš	RPN po	Pokytis (–)	Sumažėjimas (%)
1	Klijų panaudojimas ant 9 poz. varžto	336	84	–252	75%
2	Variklio ir laikiklio prisukimas (4 varžtai)	135	18	–117	87%
3	Gumos uždėjimas	280	42	–238	85%
4	O–ring tarpinės įdėjimas	392	28	–364	93%
5	Plastikinės detalės 3 poz. prisukimas	36	6	–30	83%
6	Laido sujungimas su varikliu	320	120	–200	62%
7	Dangtelio prisukimas (3 varžtai)	36	12	–24	67%
8	Klijų panaudojimas ant 8 poz. varžto	336	72	–264	79%
9	Veleno varžto prisukimas	180	36	–144	80%
10	Variklio ir laido funkcinė patikra	196	42	–154	79%
Vidurkis		224	46	–178	79%



43 pav. *FMEA RPN* rezultatai prieš ir po

Palyginus rankinio ir pusiau automatizuoto proceso *FMEA* rezultatus, matyti ryškus bendras *RPN* sumažėjimas – vidutinė rizikos vertė sumažėjo nuo 224 iki 46, t. y. apie 79 %. Tai rodo, kad įdiegta pusiau automatizuota kontrolės sistema ženkliai sumažino tiek žmogiškųjų klaidų tikimybę, tiek broko riziką.

Didžiausias pokytis pastebimas O formos tarpinės įdėjimo operacijoje, kurioje *RPN* sumažėjo net 93 % (nuo 392 iki 28). Priežastis – šioje vietoje anksčiau klaida būdavo praktiškai neaptinkama, o po automatizavimo įdiegti du jutikliai (įrankio ir kontrasto) užtikrina, kad tarpinė privalomai turi būti įdėta, kitaip ciklas nesitęsia.

Stiprus pagerėjimas matomas ir klijų panaudojimo operacijose – jų *RPN* sumažėjo 75–79 %. Prieš automatizavimą ši operacija visiškai priklausė nuo operatoriaus atminties, o po pakeitimų klijų paėmimas yra fiksuojamas mygtuko jutikliu, todėl klijų nepanaudojimo tikimybė ženkliai mažesnė.

Variklio ir laikiklio prisukimo varžtais rizika sumažėjo 87 %, nes dabar tiek suktuko paspaudimai, tiek varžtų buvimas tikrinamas jutikliais pagal loginę sąlygą. Taip pašalinama klaida, neišukti varžtų,

Laido pajungimo su varikliu operacija išlieka didžiausios rizikos vietoje (*RPN* = 120 po automatizavimo), nes čia vis dar išlieka žmogaus faktorius – funkcinis testavimas reikalauja operatoriaus sąžiningai įdėti mazgą į tikrinimo įrangą. Nors tikimybė sumažinta, gedimas vis dar laikomas kritiniu, todėl rizika išlieka aukščiausia iš visų automatizuotų žingsnių.

Apibendrinant, automatizuotas procesas leido sumažinti riziką visose dešimtyje operacijų – nuo 62 % iki 93 %. Tai patvirtina, kad tiek automatiniai jutikliai, tiek žingsninė *PLC* logika kartu su *Poka–Yoke* sprendimais yra efektyvus būdas sumažinti broko tikimybę ir stabilizuoti kokybę gamyboje.

3.6.2. Rizikų suvaldymas

Įdiegus pusiau automatizuotą surinkimo sistemą galima išskirti tris pagrindines rizikų grupes: rizikos, kurios po įrangos diegimo buvo eliminuotos arba reikšmingai sumažintos, ir galiausiai – naujai atsiradusios techninės rizikos, susijusios su pačios įrangos veikimu.

Rankinio proceso rizikos buvo įvertintos naudojant *FMEA* metodą. Didžiausi pavojai buvo susiję su žingsnių praleidimu, neteisingu varžtų prisukimu, guminių detalių neuždėjimu, klijų nepanaudojimo rizika ir variklio sujungimo klaidomis. Šios rizikos buvo žmogiškojo veiksnio pobūdžio ir turėjo tiesioginę įtaką broko atsiradimo tikimybei.

1. Rizikos, kurios buvo panaikintos
 - 1.1. Įdiegus įrangą buvo pašalinta didžioji dalis kritinių rankinio surinkimo rizikų. Automatizuotas varžtų tikrinimas, detalių pozicijų, krypties jutikliai, lazeriniai taškai ir *PLC* žingsnių logika užtikrina, kad žingsniai nebūtų praleisti, o neteisingas komponentų surinkimas būtų aptiktas iš karto. Tai leido pašalinti problemas, kurios rankiniame procese buvo dažniausios ir turėjo aukščiausią *RPN*.
2. Rizikos, kurios sumažėjo.
 - 2.1. Kai kurios rizikos išliko, tačiau tapo valdomos. Pavyzdžiui, klijų panaudojimas ant varžtų vis dar priklauso nuo operatoriaus, nes sistema tik primena paimti klijus, bet neseinama, ar jie iš tikrųjų buvo užtepti. Taip pat, surinkus mazgą, įrangą tik informuoja operatorių atlikti variklio ir jungčių patikrą, tačiau pats veiksmas nėra automatiškai kontroliuojamas. Tokiais atvejais rizika neišnyksta, tačiau ji tampa aiškiai apibrėžta ir valdoma per priminimus.
3. Naujos rizikos dėl įrangos veikimo.
 - 3.1. Kartu su nauju sprendimu atsirado techninės įrangos rizikos, kurios nebūdingos rankiniam procesui. Tai jutiklių išsiderinimas, lazerių krypties pokytis, atsisukę konstrukcijos varžtai, neveikiančios spynos, induktyvinių jutiklių gedimai. Tokiais atvejais sistema galėtų priimti neteisingus signalus ir pateikti klaidingas išvadas apie surinkimo eigą.
 - 3.2. Šios rizikos valdomos įrenginio priežiūros procedūromis, periodine vizualine apžiūra. Be to, įdiegta logika, kuri stabdo procesą esant neįprastiems jutiklių signalams, taip užtikrinant, kad gedimai neleistų tęsti surinkimo.

Apibendrinant rankinio proceso rizikos buvo reikšmingai sumažintos arba visiškai pašalintos, o naujos techninės rizikos yra identifikuotos ir valdomos numatytais priežiūros priemonėmis. Tai leidžia užtikrinti stabilų ir saugų pusiau automatizuoto surinkimo proceso veikimą.

3.7. Skyriaus apibendrinimas

Apibendrinant galima teigti, kad sukurta pusiau automatizuota surinkimo sistema visiškai pateisino projektavimo tikslus ir sėkmingai pakeitė ankstesnį rankinį procesą. Projektavimas atliktas taikant modulinės konstrukcijos, ergonomikos ir *Poka-Yoke* principus. Trys atskiros įrangos suformuotos, kaip nuosekli loginė seka, kurioje sekanti operacija gali būti vykdoma tik tada, kai atliktos visos operacijos prieš tai. Tokia struktūra leidžia tiksliai valdyti surinkimo eigą.

Diegiant naują sistemą pirma buvo suprojektuota mechaninė konstrukcija su 3D spausdintais įdėklais ir korpusu iš aliuminių profilių, vėliau buvo jutikliai, spynos ir tikrinimo elementai, o galiausiai sukurta *TIA Portal* programa kartu su operatorių vedančiu *HMI* ekranu. *HMI* sprendimai padėjo sumažinti operatoriaus klaidų tikimybę, suteikdami realaus laiko instrukcijas bei galimybę lengvai testuoti ar reguliuoti įrangą.

Eksperimentinis vertinimas parodė, kad pusiau automatizuotas procesas yra greitesnis ir stabilesnis nei rankinis. Vidutinis ciklo laikas sumažėjo 16 %, o maksimalus pasiektas surinkimo ciklo trukmė (2 min 46 s) parodė, kad sistema gali veikti dar sparčiau, kai operatorius įgunda dirbti su įranga.

FMEA analizės palyginimas prieš ir po pokyčių parodė bendrą rizikos sumažėjimą – vidutinė *RPN* reikšmė sumažėjo 79 %. Didžiausias pokytis pastebėtas tose operacijose, kurios rankiniame procese buvo sunkiausiai kontroliuojamos: tarpinės įdėjimas, gumos pozicija, varžtų prisukimas ir klijų panaudojimas. Automatizavus šiuos veiksmus ir įdiegus jutiklius, rizikos buvo panaikintos arba stipriai sumažintos. Išlikusios rizikos susijusios tik su tais veiksmais, kuriuos atlieka operatorius (pvz., klijų patepimas ar variklio funkcijos patikra), tačiau jos tapo valdomos per priminimus ir papildomas kontrolės priemonės. Naujos sistemos techninės rizikos, atsiradusios dėl sensorių ar mechaninių mazgų veikimo, taip pat identifikuotos ir priskirtos priežiūros rutinoms. Tai leidžia užtikrinti, kad pati įranga neatsineštų naujų nekontroliuojamų gedimų, o jos veikimas būtų patikimas ilgalaikėje eksploatacijoje.

Galutiniame rezultate galima teigti, kad sukurta sistema ženkliai sumažino žmogiškųjų klaidų tikimybę, neženkliai sutrumpino surinkimo ciklą ir padidino surinkimo kokybės stabilumą. Trijų įrangų loginė seka, *Poka-Yoke* sprendimai ir automatiniai tikrinimai sukuria aiškų ir patikimą surinkimo procesą. Tokiu būdu *PLC* valdoma sistema sumažina rankinio darbo klaidas ir padeda užtikrinti stabilią gaminių kokybę.

4. Ekonominė dalis

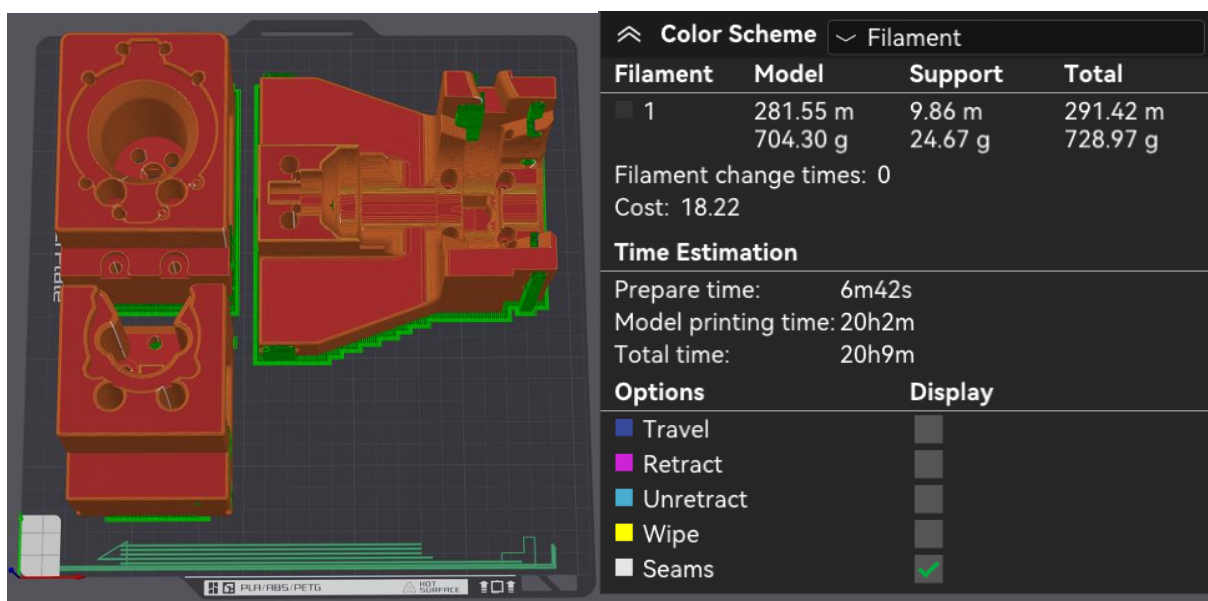
Ekonominėje projekto dalyje siekiama įvertinti, kokios realios investicijos yra būtinos naujai pusiau automatizuotai surinkimo sistemai sukurti. Kadangi projektuojama įranga apima mechanines konstrukcijas, 3D spausdintus elementus, pneumatikos komponentus ir elektronikos dalis, tampa svarbu nustatyti bendrą sistemos savikainą ir įvertinti pagrindinius kaštus, reikalingus jos pagaminimui. Ši analizė leidžia įmonėms priimti pagrįstus sprendimus dėl įrangos diegimo, palyginti investicijų dydį su tikėtina nauda ir įvertinti, ar sistemos kūrimas yra ekonomiškai pagrįstas. Šiame skyriuje pateikiami apskaičiuoti 3D spausdinimo medžiagų sunaudojimo kaštai, mechaninių, pneumatinių ir elektroninių komponentų vertė bei bendra įrangos gamybos savikaina, sudėta į lenteles.

4.1. Sunaudotos 3D spausdinimo medžiagos skaičiavimas

3D spausdinimo metu faktinis sunaudotos medžiagos kiekis nebūtinai sutampa su *CAD* modelio geometriniu tūriu. Tai lemia keli spausdinimo veiksniai: sumažintas užpildo procentas, automatiškai generuojamos detalės atramos. Dėl šių priežasčių vien tik *CAD* modelio tūris neatspindi tikrojo medžiagos poreikio, todėl reikalingas papildomas perskaičiavimo koeficientas.

Skaičiavimams buvo atrinktos trys pagrindinės detalės – kiekvienos iš trijų projektuojamų įrangų įtaisai. Šios detalės buvo importuotos į „Bambu Studio“ programą, kurioje nustatytas bendras spausdinimui reikalingos medžiagos kiekis. Visos detalės spausdintos vienodomis sąlygomis: naudojant ABS medžiagą ir 60 % užpildo parametą.

„Bambu Studio“ pateikia faktinę spausdinimo metu sunaudotos medžiagos masę gramais, ši masė pasirinkta naudoti skaičiavimams (žr. 44 pav.). Pirmiausia, remiantis ABS medžiagos tankiu, gauta masė buvo paversta į tūrį. Tuomet realus spausdinimo metu sunaudotos medžiagos tūris buvo palygintas su *CAD* aplinkoje apskaičiuotu, bendrai visų trijų detalių modelio tūriu. Šių dydžių santykis leidžia nustatyti koeficientą, kuris įvertina atramų ir sumažinto užpildo įtaką medžiagos sąnaudai.



44 pav. „Bambu Studio“ programoje naudoti modeliai ir programos apskaičiuota masė gramais

Programoje „Bambu Studio“ pateiktas visų detalių realiai sunaudotos medžiagos kiekis (masė gramais) buvo paverstas į tūrį, naudojant spausdinimo medžiagos tankį.

$$V_{realus} = \frac{m_{realus}/1000}{\rho} \quad (1)$$

m_{realus} – trijų detalių „Bambu Studio“ pateikta masė (g),

ρ – naudojamos ABS medžiagos tankis (kg/cm³),

V_{realus} – faktinis sunaudotos medžiagos tūris trimis detalėmis (cm³).

$$V_{realus} = \frac{728,97/1000}{0,00105} = 694,24 \text{ cm}^3$$

Gautas faktinis sunaudotos medžiagos tūris buvo palygintas su *CAD* aplinkoje apskaičiuotu bendrai visų trijų naudotų detalių modelio tūriu. Taip apskaičiuotas medžiagos sąnaudos koeficientas.

$$k = \frac{V_{realus}}{V_{3CAD}} \quad (2)$$

V_{3CAD} – trijų modelių tūrio vertė (cm³).

$$k = \frac{694,25}{1076,408} = 0,645$$

Šis koeficientas įvertina 3D spausdinamų detalių atramų kiekį ir užpildo procentą, lyginant su *CAD* modelio tūriu. Jo tikslumas būtų dar didesnis, jei skaičiavimams būtų naudojamas didesnis modelių kiekis, nes priklausomai nuo detalės geometrijos ir jos orientacijos spausdinimo metu kinta ir atramų kiekis, bei jų išdėstymas. Šis koeficientas toliau bus naudojamas apskaičiuoti realų bendrą 3D spausdinimo metu sunaudotos medžiagos kiekį:

$$m_{viso} = V_{CAD} \cdot k \cdot \rho \quad (3)$$

V_{CAD} – visų projekte 3D spausdintų detalių *CAD* tūris (cm³),

m_{viso} – visų projekte 3D spausdintų detalių reali masė (kg).

$$m_{viso} = 2797,83 \cdot 0,645 \cdot 0,00105 = 1,895 \text{ kg}$$

Taip gaunama reali išnaudotos medžiagos masė, kurią galima naudoti skaičiuojant išnaudotos medžiagos kainą.

4.2. Įrangos savikainos skaičiavimas

Siekiant tiksliai įvertinti, kokios investicijos būtinos įrangos pagaminimui, visi komponentai buvo suvesti į lentelę, kurioje nurodyti jų kiekiai ir vieneto kainos. Komponentų kainos buvo surinktos iš tiekėjų internetinių katalogų, gamintojų puslapių ir turimų sąskaitų faktūrų. Aiškumui užtikrinti visa įranga buvo suskirstyta į tris pagrindines kategorijas: pneumatika, elektronika ir konstrukcinės dalys, į kurias įtraukti aliuminio profiliai, tvirtinimo elementai ir 3D spausdinimo medžiagų sąnaudos. Tokia struktūra leido tiksliai apskaičiuoti kiekvienos dalies kainą ir sudaryti bendrą visos įrangos savikainos įvertinimą (žr. 11 lentelę).

11 lentelė Pusiaus automatizuotos pavaros mazgo surinkimo sistemos kaštų analizė

Kategorija	Komponentas / detalė	Kiekis	Vienetai	Vieneto kaina (€)	Bendra kaina (€)	Pastabos
Pneumatika	Cilindras - 5177082 ADN-S-10-5-I-A	7	vnt	35.36	247.52	Spynų cilindras
	Vožtuvas - 8042568 VUVG 1	9	vnt	105	945	Elektriniai vožtuvai (įjungti, išjungti)
	Cilindras - _CQMB12-10(0)	1	vnt	45	45	Vėliavėlės tikrinimo cilindras
	Cilindras - 537125 ADNGF-20-15-P-A---(Z)	1	vnt	95.65	95.65	3 induktyvinių jutiklių cilindras
	Slopintuvas - UC-1/8	18	vnt	4.62	83.16	Vožtuvo slopintuvas
	Vamzdelis pneumatikai	60	m	3.64	218.4	
Elektronika	Fotoelektrinis lazeris - GSE6L-X42XX_S304147	2	vnt	207.3	414.6	Lazeris tikrinimui
	Mechaninis mygtukas - SS_5GL_FT	3	vnt	2.85	8.55	1.1 pozicijos mygtukas, klijų mygtukas ir suktuko paspaudimų fiksavimui
	Fotoelektrinis jutiklis - PM-L25	3	vnt	22.26	66.78	Gumos spaustuvo pozicijos nustatymui ir vėliavėlės tarpelio stebėjimui
	Kontrastinis jutiklis - KTM-LP55181P	1	vnt	391.52	391.52	O formos tarpinės tikrinimui
	Induktyvinis jutiklis - Omron E2B_S08KS02_MC_B1	9	vnt	33	297	1 ir 2 įrangos darbo pozicijos nustatymui ir 2.4 pozicijos dėtuves pakėlimo, nuleidimo stebėjimui
	Valdymo ekranas - SIEMENS HMI KTP700 BASIC	1	vnt	630.11	630.11	Ekranas programos valdymui ir instrukcijos rodymui
	PLC blokas - 6ES7211-1HE40-0XB0	1	vnt	157	157	Programavimui Siemens PLC valdiklis
	PLC bloko papildymas - 6ES7223-1PH32-0XB0	1	vnt	146.25	146.25	Blokas išplėsti įėjimus ir išėjimus
	Kabelis jutiklių pajungimui	14	vnt	10.91	152.74	
Elektronika	Kabelis jutiklių pajungimui- NEBU-M8W3-K-5-LE3	3	vnt	9.47	28.41	

Kategorija	Komponentas / detalė	Kiekis	Vienetai	Vieneto kaina (€)	Bendra kaina (€)	Pastabos
	Induktyvinis jutiklis - Sick IME08-02BPSZT0K	8	vnt	30.2	241.6	3 įrangos darbo pozicijos nustatymui, spaustuvo užspaudimui ir detalės varžtų 4 varžtų tikrinimui
Konstrukcija	Karietėlė - HGH15CAZ0H	3	vnt	42	126	Karietėlė perstumti detalę į kitą darbo poziciją
	Karietėlės bėgelis - HGR15R250	1154	mm	0.08	92.32	Bėgelis karietėlei judėti
	Atraminė poveržlė - Z55/18x3	9	vnt	2.68	24.12	Atraminis paviršius spynų kaiščiui remtis
	Kaištis su ištraukimo sriegiu Z26/6x28	7	vnt	1.2	8.4	Kaištis prisukamas ant spynų cilindro stūmoklio
	Aliuminis profilis - 20x20	17709	mm	0.005947	105.32	Aliuminio profilio konstrukcija
	Aliuminio proflio kampo komplektas	102	vnt	2.8975	295.55	Aliuminio profilio konstrukcija
	Aliuminio profilio 20x20 M5 veržlė	81	vnt	1.2	97.2	Aliuminio profilio konstrukcija
	Rankinis prispaudėjas - GN 820-75-MC	1	vnt	39	39	Dangtelio prispaudimui
	Išstūmimo strypas - Z02/14x160	1	vnt	16.71	16.71	Gumos spaustuvo slankiklis
	Kreipiančioji įvorė, slydimui - Z11/46x14	1	vnt	18.2	18.2	Gumos spaustuvo įvorė slankiklio pozicijai užtikrinti
	Šarnyrinė galvutė SA 08 T/K	1	vnt	1.9	1.9	Gumos spaustuvo sukimo judesį perduoda į linijinį
	Įvorė PCM060810E	2	vnt	0.37	0.74	Gumos spaustuvo slydimo įvorė
	Petinis varžtas - Z38/8x30 M6	1	vnt	3.03	3.03	Varžtas turintis tikslų cilindrinį paviršių, naudojama apjungti plokšteles
	Petinis varžtas - Z38/6x30 M5	1	vnt	3.11	3.11	Varžtas turintis tikslų cilindrinį paviršių, naudojama apjungti plokšteles
	3D ABS spausdinimo medžiaga	1.895	kg	23	43.59	Įdėklai, korpusai, laikikliai
Iš viso:					5044.47	

12 lentelė. Kaštų pasiskirstymas pagal kategorijas

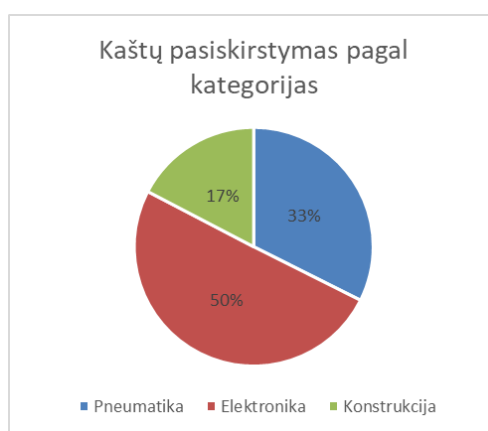
Kategorija	Suma, €	Dalis nuo bendros sumos, %
Pneumatika	1634.73	32.4
Elektronika	2534.56	50.2
Konstrukcija	875.18	17.3

Apibendrinus visų komponentų savikainos skaičiavimus nustatyta, kad bendra įrangos kaina sudaro 5044,47 €. Išskaidžius kaštus į tris pagrindines kategorijas (žr. 12 lentelę) matyti aiški struktūra:

didžiausią dalį sudaro elektronikos komponentai – 50,2 %, arba 2534,56 €. Ši kategorija brangiausia, nes ją sudaro *PLC* valdikliai, valdymo ekranas ir didesnės vertės jutikliai, tiesiogiai atsakingi už sistemos valdymą ir tikrinimo funkcijas.

Antroje vietoje pagal kaštus yra pneumatika, sudaranti 32,4 % visos sumos (1634,73 €). Šią dalį sudaro cilindrai, vožtuvai, slopintuvai ir pneumatiniai vamzdeliai, kurie yra būtini mechaniniams judesiams ir detalių pozicionavimui užtikrinti.

Konstrukcijos kategorija sudaro tik 17,3 % visų kaštų (875,18 €). Mažiausia šios dalies reikšmė susidarė todėl, kad įrenginys gamintas naudojant aliuminio profilių konstrukciją ir 3D spausdintas detales, kurios pasižymi itin geru kainos ir funkcionalumo santykiu. 3D spausdinimas leido išvengti brangių apdirbimo procesų, o profiliai suteikė galimybę greitai ir ekonomiškai suformuoti tvirtą, modulines savybes turinčią konstrukciją.



45 pav. Kaštų pasiskirstymas pagal kategorijas, išreikšta procentais.

Iš analizės matyti, kad didžiausia investicijų dalis tenka elektronikai, nes ši kategorija lemia sistemos tikslumą, automatinį tikrinimą ir duomenų valdymą. Pneumatiniai komponentai sudaro vidutinę kaštų dalį, o mechaninė konstrukcija yra ekonomiškai efektyviausia įrangos dalis (žr. 45 pav.). Toks rezultatų pasiskirstymas patvirtina, kad pasirinktas 3D spausdinimo ir aliuminio profilio derinys buvo ekonomiškai pagrįstas – jis sumažino konstrukcijos savikainą, pagreitino gamybą ir išlaikė reikiamą konstrukcijos funkcionalumą. Tokiu būdu galima daryti išvadą, kad šis įrangos projektavimo metodas yra ne tik techniškai pagrįstas, bet ir finansiškai naudingas, ypač naudoti prototipams ir mažų serijų gamybos kontekste.

4.3. Skyriaus apibendrinimas

Apibendrinant galima teigti, kad atlikta ekonominė analizė leido įvertinti visos suprojektuotos pusiau automatizuotos įrangos savikainą ir nustatyti, kurios komponentų grupės daro didžiausią įtaką bendriems kaštams. Apskaičiavus 3D spausdinimo medžiagų kiekį, suvedus visų mechaninių, pneumatinių ir elektroninių elementų kainas bei atlikus procentinį išskaidymą, nustatyta, kad didžiausią dalį sudaro elektronikos komponentai, nes jų kaina tiesiogiai susijusi su valdymo įrangos, jutiklių ir *HMI* sprendimų verte. Pneumatika sudaro vidutinę kaštų dalį, o konstrukcinė dalis yra mažiausia dėl aliuminio profilių ir 3D spausdinimo ekonomiško. Šie rezultatai parodė, kad pasirinktas konstrukcijos sprendimas yra finansiškai racionalus, o 3D spausdinimo ir standartinių profilių naudojimas leidžia ženkliai sumažinti įrangos gamybos savikainą ir užtikrina greitą sistemos pritaikomumą gamybos poreikiams.

Išvados

1. Įgyvendinant pirmąjį darbo uždavinį buvo išnagrinėti pusiau automatizuotų surinkimo procesų valdymo principai, *Lean* metodų taikymo galimybės ir šiuolaikinių technologijų integracija. Literatūros analizė parodė, kad šiuolaikinėje pramonėje vis dažniau taikomi žmogaus ir roboto bendradarbiavimo sprendimai, kobotai, dirbtinis intelektas ir skaitmeniniai dvyniai, kurie leidžia pereiti nuo galutinės kokybės patikros prie nuolatinio proceso stebėjimo. Kartu nagrinėti *Lean*, *5S*, *FMEA* ir *Poka-Yoke* metodai bei 3D spausdinimo technologija parodė, kad derinant aiškiai struktūruotą darbo vietą, rizikos analizę ir klaidų prevencijos priemones galima sukurti pusiau automatizuotą surinkimo sistemą, kuri pagrįstai mažina žmogaus klaidų tikimybę ir užtikrina stabilesnę kokybę.
2. Sukūrus pusiau automatizuoto proceso loginę seką ir ją įgyvendinus *Siemens TIA Portal* aplinkoje nustatyta, kad žingsninė *PLC* logika ir *HMI* ekranų vizualinės instrukcijos leidžia operatoriui atlikti tik tuos veiksmus, kurie yra logiškai leidžiami sistemos. Tai reiškia, kad neteisinga operacija arba praleistas žingsnis tampa praktiškai neįmanomas, o pati programa aiškiai apibrėžia visų trijų įrangų sąveiką ir tikrinimo sąlygas. Praktiniai bandymai parodė, kad sukurtas algoritmas veikia stabiliai, yra aiškus ir lengvai pritaikomas galimiems ateities gaminio pokyčiams.
3. Palyginus rankinio ir pusiau automatizuoto proceso rezultatus, nustatytas akivaizdus kokybės ir stabilumo pagerėjimas. Vidutinė *RPN* reikšmė sumažėjo nuo 224 iki 46, o atskirų operacijų rizikų sumažėjimas siekė 62–93 %, kas įrodo, kad žmogaus sukeltų klaidų tikimybė iš esmės buvo eliminuota. Tuo pačiu, vertinant proceso efektyvumą pagal ciklo laiką, matyti, kad nors vidutinis surinkimo ciklas sutrumpėjo 16 %, realus pagreitėjimas labiausiai atsiskleidė tik įgudusiam operatoriui, o mažiau patyrusių darbuotojų rezultatai išliko panašūs į ankstesnius.
4. Įvertinus įrangos ir įtaisų kaštus nustatyta, kad bendra sistemos savikaina siekia 5044,47 €, o didžiausia išlaidų dalis tenka elektronikai dėl valdiklių, ekranų ir jutiklių kainos. Pneumatiniai komponentai sudaro trečdalį visos sumos, o konstrukcinė dalis — vos 17,3 %, nes konstrukcija sukurta iš aliuminio profilių ir 3D spausdintų elementų. Tai patvirtina, kad tokia konstrukcija yra ekonomiškai racionali, lengvai modifikuojama ir tinkama lankstiems gamybos poreikiams. Įvertinus kainą kartu su rizikų sumažėjimu ir proceso stabilumo pagerėjimu, sistemą galima laikyti ekonomiškai pagrįstu sprendimu.

Literatūros sąrašas

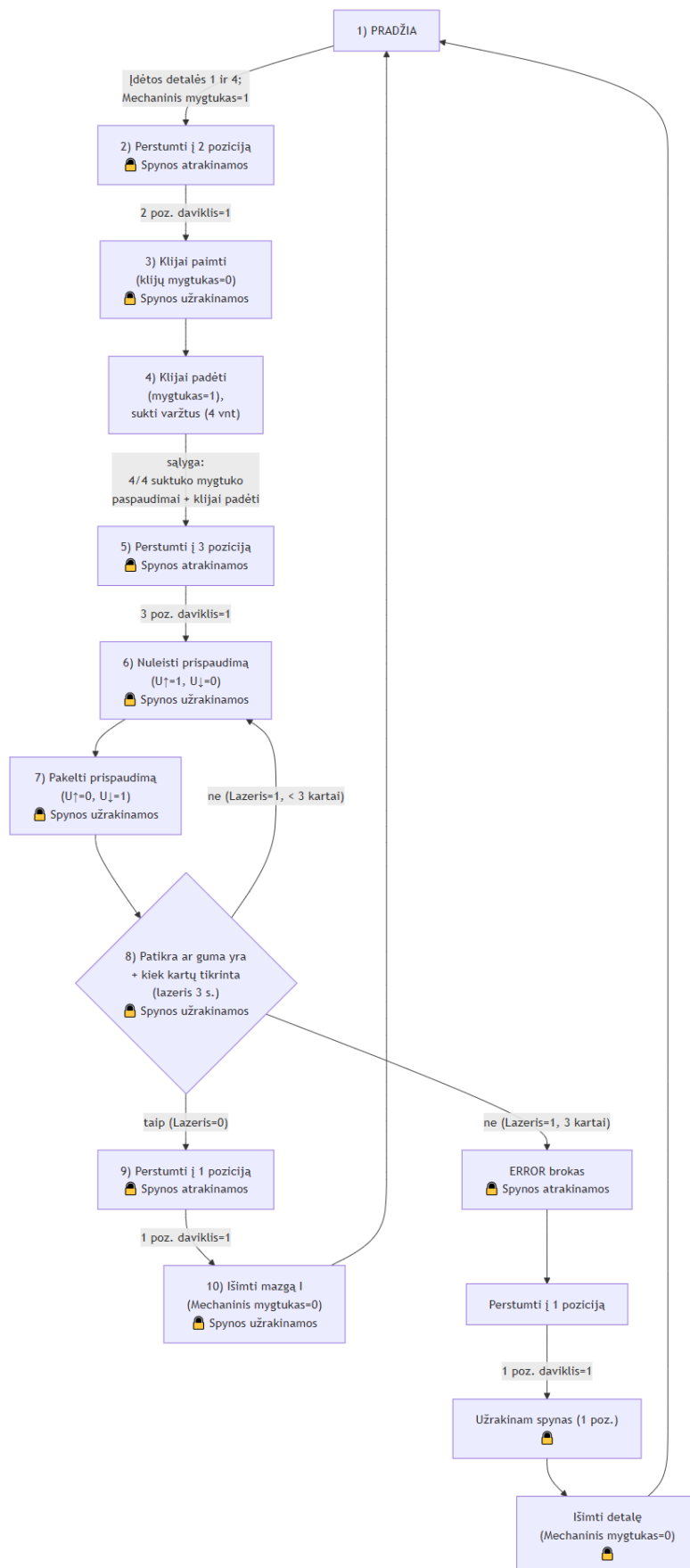
1. DUARTE, L. - NEVES, M. - NETO, P. Benchmarking human-robot collaborative assembly tasks. In *arXiv.org* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2025-09-20]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00708>>.
2. AO, Y. - ZHOU, Q. - YUAN, W. - YE, Q. - POPA, D. - ZHANG, Y. Human-Robot Collaborative Assembly and Welding: A review and analysis of the state of the art. In *Journal of Manufacturing Processes* . 2024. Vol. 131, p. 1388–1403.
3. JIANG, Y. - HUANG, Z. - YANG, B. - YANG, W. A review of Robotic Assembly Strategies for the full operation procedure: Planning, execution and Evaluation. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* . 2022. Vol. 78, p. 102366.
4. KESHVARPARAST, A. - BATTINI, D. - BATTIAIA, O. - PIRAYESH, A. Collaborative Robots In Manufacturing and Assembly Systems: Literature Review and Future Research Agenda. In *Journal of Intelligent Manufacturing* . 2023. Vol. 35, no. 5, p. 2065–2118.
5. OUDA, E. - HAGGAG, M. Automation in modular construction manufacturing: A comparative analysis of assembly processes. In *MDPI* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2025-09-28]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/385240939_Automation_in_Modular_Construction_Manufacturing_A_Comparative_Analysis_of_Assembly_Processes>.
6. PAPAVALASILEIOU, A. - MICHALOS, G. - MAKRIS, S. Quality Control in manufacturing – review and challenges on robotic applications. In *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* . 2024. Vol. 38, no. 1, p. 79–115.
7. URGO, M. - TERKAJ, W. - SIMONETTI, G. Monitoring Manufacturing Systems using AI: A method based on a digital factory twin to train cnns on Synthetic Data. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* . 2024. Vol. 50, p. 249–268.
8. CAPUTO, A.C. - PELAGAGGE, P.M. - SALINI, P. Economic comparison of manual and automation-assisted Kitting Systems. In *IFAC-PapersOnLine* . 2018. Vol. 51, no. 11, p. 1482–1487.
9. TROJANOWSKA, J. - HUSÁR, J. - HREHOVA, S. - KNAPČÍKOVÁ, L. Poka Yoke in smart production systems with pick-to-light implementation to increase efficiency. In *MDPI* [interaktyvus]. 2023. [žiūrėta 2025-10-10]. Prieiga per internetą: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/21/11715>>.
10. PRABOWO, R.F. - AISYAH, S. Poka-yoke method implementation in industries: A systematic literature review. In *IJIEM - Indonesian Journal of Industrial Engineering and Management* . 2020. Vol. 1, no. 1, p. 12.
11. AL AYYUBI, M.C. - MAHMUDAH, H. - SALEH, A. - RACHMADI, R.R. Implementation of poka-yoke system to prevent human error in material preparation for industry. In *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* . 2020. p. 273–278.
12. MARTINELLI, M. - LIPPI, M. - GAMBERINI, R. Poka Yoke meets deep learning: A proof of concept for an assembly line application. In *MDPI* [interaktyvus]. 2022. [žiūrėta 2025-10-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11071>>.
13. MAZUR, M. - KORENKO, M. - ŽITŇÁK, M. - SHCHUR, T. - KIELBASA, P. - DOSTÁL, P. - DZHIDZHORA, O. - IDZIKOWSKI, A. Implementation and benefits of the 5S method in

- improving workplace organisation – A case study. In *Management Systems in Production Engineering* . 2024. Vol. 32, no. 4, p. 498–507.
14. MONNANYANA, O. - GUPTA, K. A case study on implementation of 5s in a manufacturing plant to improve operational effectiveness. In *MATEC Web of Conferences* [interaktyvus]. 2021. [žiūrėta 2025-10-12]. Prieiga per internetą: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2021/15/mateconf_icmtmt2021_03109/mateconf_icmtmt2021_03109.html>.
 15. PURWADI - Y, S. - SAMPELILING, A. FMEA approach of Lean Six Sigma implementation: Estimating the value of COPQ. In *International Journal of Psychosocial Rehabilitation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-10-17]. Prieiga per internetą: <<https://psychosocial.com/index.php/ijpr/article/view/4136>>.
 16. EL-AWADY, S.M. Overview of failure mode and effects analysis (FMEA): A patient safety tool. In *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare* . 2023. Vol. 6, no. 1, p. 24–26.
 17. ERVURAL, B. - AYAZ, H.I. A fully data-driven FMEA framework for risk assessment on manufacturing processes using a hybrid approach. In *Engineering Failure Analysis* . 2023. Vol. 152, p. 107525.
 18. JIANG, S. - LIU, Z. - CHEN, J. A dynamic failure mode and effect analysis (FMEA) method for CNC machine tool in service. In *ADS* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-10-15]. Prieiga per internetą: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023JPhCS2483a2047J/abstract>>.
 19. LIU, J. - WANG, D. - LIN, Q. - DENG, M. Risk assessment based on FMEA combining DEA and cloud model: A case application in robot-assisted rehabilitation. In *Expert Systems with Applications* . 2023. Vol. 214, p. 119119.
 20. SCHNEIDER, D. - WOERLE, M. - KAGERMEIER, J. - ZAEH, M.F. - REINHART, G. Sustainability Risk Assessment in manufacturing: A life cycle assessment-based failure mode and effects analysis approach. In *Sustainable Production and Consumption* . 2024. Vol. 47, p. 617–631.
 21. STAMATIS, D. H. Failure Mode and Effect Analysis. In *Google knygos* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-10-16]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?id=TTxI8jbTkVwC&source=gbs_navlinks_s>.
 22. JADHAV, A. - JADHAV, V.S. A review on 3D printing: An Additive Manufacturing Technology. In *Materials Today: Proceedings* . 2022. Vol. 62, p. 2094–2099.
 23. DILBEROGLU, U.M. - GHAREHPAPAGH, B. - YAMAN, U. - DOLEN, M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. In *Procedia Manufacturing* . 2017. Vol. 11, p. 545–554.
 24. KUMAR, S.A. - TUSHAR, J. Review of 3D printing applications in Biomedical Engineering: A comprehensive analysis. In *Journal of Clinical and Biomedical Sciences* [interaktyvus]. 2024. [žiūrėta 2025-10-20]. Prieiga per internetą: <<https://jcbsonline.ac.in/articles/review-of-3d-printing-applications-in-biomedical-engineering-a-comprehensive-analysis>>.
 25. JENA, M.C. - MISHRA, S.K. - MOHARANA, H.S. Application of 3D printing across various fields to enhance sustainable manufacturing. In *Asia Pacific Academy of Science Pte. Ltd.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-10-20]. Prieiga per internetą: <<https://aber.apacsci.com/index.php/SSD/article/view/2864>>.

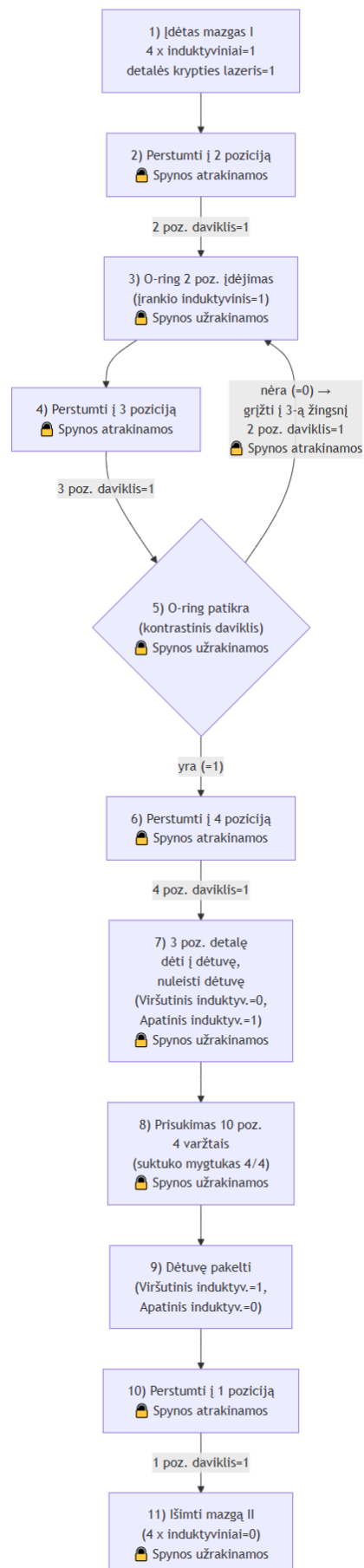
26. GŘEŠICA, D. - JURAČKA, D. - LEHNER, P. - KREJSA, M. Usability of 3D printing in Construction Industry. In *Procedia Structural Integrity* . 2024. Vol. 63, p. 7–12.
27. MUTH, J. - KLUNKER, A. - VÖLLMECKE, C. Putting 3D printing to good use-Additive Manufacturing and the Sustainable Development Goals. In *Frontiers* [interaktyvus]. 2023. [žiūrėta 2025-11-10]. Prieiga per internetą: <<https://www.frontiersin.org/journals/sustainability/articles/10.3389/frsus.2023.1196228/full>>.
28. THOMAS, A. - MISHRA, U. A sustainable circular economic supply chain system with waste minimization using 3D printing and emissions reduction in plastic reforming industry. In *Journal of Cleaner Production* . 2022. Vol. 345, p. 131128.
29. BEN SAID, L. - AYADI, B. - ALHARBI, S. - DAMMAK, F. Recent advances in Additive Manufacturing: A review of current developments and Future Directions. In *Machines* . 2025. Vol. 13, no. 9, p. 813.
30. ANTIĆ, J. - MIŠKOVIĆ - MITROVIĆ, R. - STAMENIĆ, Z. - ANTELJ, J. The risk assessment of 3D printing FDM Technology. In *Procedia Structural Integrity* . 2023. Vol. 48, p. 274–279.

Priedai

1 priedas. Pirmos įrangos loginė schema pateikta paveikslu.



2 priedas. Antros įrangos loginė schema pateikta paveikslu.



3 priedas. Trečios įrangos loginė schema pateikta paveikslu.

