



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Dujų stoties duomenų analizės algoritmų, skirtų pažengusių
aliarmų formavimui, sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Martynas Tirlikas

Projekto autorius

Lekt. dr. Darius Ezerskis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Dujų stoties duomenų analizės algoritmų, skirtų pažengusių
aliarmų formavimui, sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Martynas Tirlikas

Projekto autorius

Lekt. dr. Darius Ezerskis

Vadovas

Prof. Dr. Vytautas Galvanauskas

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Martynas Tirlikas

Dujų stoties duomenų analizės algoritmų, skirtų pažengusių aliarmų formavimui, sukūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Martyno Tirliko, baigiamasis projektas tema „Dujų stoties duomenų analizės algoritmų, skirtų pažengusių aliarmų formavimui, sukūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

Martynas Tirlikas. Dujų stoties duomenų analizės algoritmų, skirtų pažengusių aliarmų formavimui, sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas. Vadovas lekt. dr. Darius Ezerskis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija (Inžinerijos mokslai)

Reikšminiai žodžiai: Duomenų analizė, reguliavimo sklendė, PLV, algoritmas, aliarmai, gamtinės dujos.

Kaunas, 2020. 58 psl.

Santrauka

Didėjant dujų transportavimo srautams reikalinga užtikrinti patikimą ir efektyvų jų valdymą dujų stotyse. Dujų srauto reguliavimui naudojamos reguliavimo sklendės, kurioms, kaip ir kiekvienam įrenginiui, reikalinga techninė priežiūra. Šiame darbe išanalizuota literatūra dujų reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų fiksavimui. Išanalizuoti dujų stoties istoriniai duomenys galintys nusakyti reguliavimo sklendės darbo taškus. Pasirinkti paieškos principai darbo taškų formavimui ir panaudojimui pramonėje. Sukurti skirtingi algoritmai priklausomai nuo paieškos principo, sukurtas detalus atrastų aliarminių įvykių analizės algoritmas nurodantis paklaidų kitimo ribas ir standartinę nuokrypį. Sukurti algoritmai praktiniam panaudojimui išbandyti naudojant turimą programuojamą loginį valdiklį testavimo aplinkoje. Visi algoritmai patikrinti naudojant istorinius dujų stoties duomenis. Gauti rezultatai rodo, kad analizuojant dujų stoties duomenis galima nustatyti reguliavimo sklendžių darbo taškuose atsirandančius darbo sutrikimus, kurie gali būti naudojami aliarmams generuoti.

Martynas Tirlikas. Development and Investigation of Natural Gas Station Data Analysis Algorithms for Advanced Alarm Generation. Master's Final Degree Project. Supervisor lect. dr. Darius Ezerskis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering (Engineering Science)

Keywords: process data analysis, regulator, PLC, algorithm, advanced alarms, natural gas.

Kaunas, 2020. 58 p.

Summary

Due to the worldwide increase of natural gas consumption, safe and reliable gas transportation must be ensured. The key component in gas transportation are regulators which control pressure and flow in the pipeline, and they require maintenance for safe operation. Most common researches on gas regulator fault detection are analyzed. A historical process data is analyzed to see if there are any discrepancies in a 2-year working period which might indicate regulator malfunction. A new approach in regulator fault detection is suggested using PLC. Different algorithms are developed and tested for statistical error tracking using 2 approaches to define regulator working point. Algorithms are tested using historical data and results are compared with previously analyzed historical data results. The results showed that regulator working point creation can be used for finding statistical error, which tends to increase, in a long working period. Based on analysis and gathered results, it can be stated that proposed algorithms can be implemented in industrial systems using PLC, for natural gas regulator fault detection

Turinys

Santrumpų ir terminų sąrašas	7
Įvadas.....	8
1. Dujų stoties reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų analizė mokslinėje literatūroje	9
2. Klasikiniai aliarmų generavimo algoritmai	11
2.1. Duomenų analizės algoritmas taikant signalo vėlinimą	12
2.2. Duomenų analizės algoritmas taikant duomenų filtravimą	13
3. Pažengę duomenų analizės algoritmai.....	15
3.1. Būsenų pasikeitimo aliarmavimas.....	17
3.2. Aliarmavimas remiantis matematiniu sistemos modeliu.....	18
4. Dujų stoties technologinis procesas.....	19
4.1. Reguliavimo vožtuvo veikimas	21
4.2. Naudojama įranga.....	21
5. Duomenų analizė	22
5.1. Minimalių ir maksimalių duomenų režijų parinkimas darbo taškų formavimui	22
5.1.1. Pirmos reguliavimo sklendės duomenų režiai	22
5.1.2. Antros reguliavimo sklendės duomenų režiai	25
5.1.3. Bendri ribiniai parametrų režiai.....	27
5.2. Aliarminių įvykių sudarymo principai naudojamiems algoritmams	28
5.3. Duomenų masyvų analizė naudojamai įrangai ir paieškos principų formavimui	30
6. Sukurti algoritmai aliarminių įvykių formavimui	34
6.1. Istorinių duomenų analizės algoritmas	34
6.2. Algoritmas tausojantis PLV atmintį	35
6.3. Algoritmas tikrinantis ieškomus parametrus panašiuose darbo taškuose skirtingų reguliavimo sklendžių duomenyse.....	39
6.4. Algoritmas aliarminių įvykių detaliai analizei remiantis matuojamų duomenų vidurkiais ir nuokrypiais	40
7. Tyrimų rezultatai.....	42
7.1. Istorinių duomenų analizės algoritmo aliarminių įvykių formavimo rezultatai naudojant skirtingas paklaidas	42
7.1.1. Istorinių duomenų analizė ieškant panašaus įėjimo slėgio, išėjimo slėgio ir srauto	42
7.1.2. Istorinių duomenų analizė ieškant panašaus atsidarymo procento, įėjimo slėgio ir išėjimo slėgio	43
7.1.3. Naudotų paieškos principų tarpusavio palyginimas.....	45
7.2. Tausojančio PLV atmintį algoritmo rezultatai	46
7.2.1. Detalūs tausojančio PLV atmintį algoritmo rezultatai	50
7.2.2. RV32 ir RV35 rezultatų palyginimas tuose pačiuose darbo taškuose.....	51
7.3. Istorinio duomenų analizės ir tausojančio PLV atmintį algoritmų rezultatų palyginimas	52
7.4. Algoritmų, skirtų PLV, palyginimas	54
Išvados	56
Literatūros sąrašas	57

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ASM – Abnormal Situation Management Consortium;

EEMUA – The Engineering Equipment and Materials Users Association;

ISA - International Society of Automation;

LL – avarinė žemo lygio aliarmo riba;

L – žemo lygio įspėjimo riba;

H – aukšto lygio įspėjimo riba;

HH – avarinė aukšto lygio aliarmo riba;

ROC – receiver operating characteristic;

PLV – programuojamas loginis valdiklis;

SVM – atraminių vektorių mašina.

Ivadas

Baigiamajame magistriniame darbe nagrinėjami dujų stoties duomenų analizės algoritmai pažangiems aliarmams formuoti. Sudėtingėjantys procesai bei fiksuojamų parametrų kiekiai priverčia tobulinti aliarmų generavimo sistemas, kad jos taptų informatyvesnės, konkretesnės, padėtų greitai diagnozuoti atsiradusias problemas. Didžiausios pramoninės katastrofos įvyko dėl neišsamios proceso analizės ar per didelio pasirodančio aliarmų kiekio vienu metu. Siekiant sumažinti katastrofų skaičių ir pagerinti sąlygas, sukurti tarptautiniai standartai, kuriais vadovaujantis turi būti kuriamos sistemos aliarminių įvykių generavimui. Šio darbo pradžioje apžvelgiami esami standartai bei jiems priskiriami duomenų analizės algoritmai kritiniams įvykiams formuoti.

Dujų srauto reguliavimo sklendžių aliarmų formavimui įprastai naudojamos vidinės pavaros klaidos arba tikrinamas nuostato ir grįžtamojo ryšio santykis siekiant pastebėti netikslumą valdyme, tačiau niekas neanalizuoja vykstančio technologinio proceso ir jo sąlygų. Analizuojamos dujų srauto reguliavimo sklendės magistraliniame dujotiekyje, kur susiduriama su dideliais srautais, galinčiais siekti šimtus tūkstančių kubinių metrų per valandą bei dideliais slėgiais siekiančiais iki 50 barų. Prie tokių darbo sąlygų naudojama įranga turi būti ilgai tarnaujanti, patikima, kad esamas procesas būtų tiksliai suvaldomas.

Šio darbo pagrindinis tikslas – sukurti praktikoje naudotinus algoritmus galinčius nustatyti dujų srauto reguliavimo sklendžių darbo sutrikimus iš technologinio proceso duomenų naudojant PLV. Tokių algoritmų panaudojimas palengvintų nustatant reguliavimo sklendžių nusidėvėjimą ir planuojant reikalingą techninį aptarnavimą.

Prieš kuriant algoritmus išanalizuoti 2 metų istoriniai duomenys norint žinoti stebimų parametrų kitimų ribas, jų pasiskirstymą, darbo režimus. Suformuoti paieškos principai aliarmams formuoti ir aliarmuojantys kintamieji. Išanalizuotos praktinio pritaikymo galimybės naudojami techninei ir programinei įrangai, parengtos optimizavimo gairės. Sukurti algoritmai istorinių ir realaus laiko duomenų analizei skirtingoms programinėms įrangoms, naudojantis skirtingais paieškos principais.

Šiame darbe gauti rezultatai rodo, kad ilguoju laikotarpiu analizuojant dujų stoties technologinio proceso duomenis galima aptikti reguliavimo sklendžių augančią santykinę paklaidą priklausomai nuo išdirbto darbo laiko. Taip pat pritaikant algoritmų optimizavimą, sukurtus algoritmus galima naudoti praktikoje pateikiant išsamią aliarmų analizę PLV lygmenyje.

1. Dujų stoties reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų analizė mokslinėje literatūroje

Saugiam dujų transportavimui užtikrinti statomos dujų stotys, kuriose dujų srautai valdomi reguliavimo sklendėmis. Siekiant, kad transportavimas vyktų sklandus ir patikimas, reikia užtikrinti reguliavimo sklendžių patikimą veikimą. Mokslinėje literatūroje galima atlikti įvairių algoritmų tyrimų kuriais siekiama nustatyti reguliavimo sklendžių darbo sutrikimus.

2006 metais atliktame tyrime [1], autoriai analizuoja reguliavimo sklendės diafragmos vibracijos pokyčius naudojant mokymosi mašinos branduolio metodus apibūdintus atraminių vektorių mašina (angl. support vector machine – SVM) [2], kurie šiame darbe įvardinti kaip iš anksto nustatomas gedimas. Dėl didelių garsinių trikdžių įprastiniai analizės metodai netinkami, todėl autoriai naudojami atraminiais vektoriais ir Kullback-Leibler (KL) branduoliu. KL branduolys naudotas atrasti panašumus tarp tikimybinių pasiskirstymų iš naudotų duomenų. Gauti rezultatai parodė, kad naudojant KL branduolį darbo sutrikimų diagnozavimas yra geresnis negu naudojant polinomų ar Gauso branduolį, o gautas tikslumas siekė 92%.

Kitame moksliniame straipsnyje [3], analizuojami reguliavimo sklendžių mechaniniai pažeidimai. Jame autoriai nagrinėja mechaninius pažeidimus atsiradusius ant naudotų reguliavimo sklendžių. Tyrimo tikslas buvo nustatyti kas turi didžiausią įtaką dėvėjimuisi ir gali lemti sugedimą. Rezultatuose pateikta, kad didžiausi pokyčiai pastebėti dėl technologinio proceso padarinių liejant sklendes gamyklose. Dėl šios priežasties, jos tampa mažiau atsparios korozijai.

2017 metais pasirodžiusiame straipsnyje [4] analizuojamas dujų reguliavimo sklendės sutrikimas naudojant gilaus pasitikėjo tinklą (angl. deep confidence network) [5]. Tyrimas atliktas turint 80 darbo sutrikimų įrašų, kurie išskirti į žemo dažnio sutrikimus (didelis užsidarymo slėgis), aukšto dažnio sutrikimus ir normalaus darbo režimą. Sukurtas 5 sluoksnių gilias pasitikėjimo tinklas, kurio tikslumas nusakant sutrikusius darbo taškus siekė 70%.

Dong Yinxing [6] savo straipsnyje pateikė suspausto jutimo (angl. compressed sensing) [7] metodo naudojimą, siekiant nustatyti reguliavimo sklendžių darbo sutrikimus. Tyrimą sudaro du eksperimentai: 1) 1 klasifikatorius, paremtas reto pateikimo klasifikavimo algoritmu ir 2) patobulintas PCA-RBF neuroninių tinklų diagnostinis metodas PCA ir PCB neuroniniais tinklais skirtais klasifikuoti reguliavimo sklendės gedimus. Gauti rezultatai parodė, kad naudojant suspausto jutimo metodą, galima gauti tikslius diagnostinius rezultatus, kai naudojant 1 klasifikatorių gautas 92,8% darbo sutrikimų atpažįstamumas.

Kitame, 2017 metais pasirodžiusiame moksliniame darbe [8], autoriai nagrinėja reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų fiksavimą naudojant akustinės emisijos metodą [9]. Akustinę emisiją galima apibrėžti kaip fizikinį reiškinį, kai staigiai išsiskirianti energija daikto ar medžiagos viduje sukuria momentinę tampriąją bangą. Dėl šios priežasties medžiaga ar konstrukcija deformuojasi dėl veikiančių vidinių jėgų, išlaisvinančių deformacijos energiją elastinių bangų pavidalu. Naudojant šį metodą galima įvertinti vidinį struktūros pažeidimo laipsnį ir tai labai tinka ilgalaikiam realaus laiko įrangos gedimo aptikimui [10]. Diagnostinis įrangos įvertinimas šiuo metodu siekė daugiau negu 95% patikimumą aptinkant darbo sutrikimą.

Dar viename moksliniame darbe autoriai remiasi atraminiais vektoriais (SVM) siekiant nustatyti gedimą [11]. SVM įėjimo signalams naudojamas slėgis už reguliavimo sklendės, o išėjimo signalas iš SVM nurodomas kaip reguliavimo sklendės darbo režimas. Eksperimentui naudoti įėjimo signalo

duomenys suskirstyti į mokymosi ir testavimo, santykiu 4:1. Naudojant 10 kryžminių patvirtinimų tinklą atraminių vektorių mašinai gautas darbo sutrikimų nustatymo tikslumas siekė 75,3%.

2019 metais pasirodžiusiame straipsnyje [12], autoriai, atsižvelgdami, kad dujų slėgio signalas už reguliavimo sklendės yra netiesinis, siūlo naudoti pilną empirinio modelio išskaidymo su pridėtinu triukšmu (angl. complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise – CEEMDAN) metodą ir neraiškų c – vidurkių (angl. fuzzy c-means – FCM) grupavimą, siekiant išskirti 3 pagrindinius reguliavimo sklendės darbo sutrikimus: viršįtampio sutrikimą, žemą išėjimo slėgį ir aukštą užsidarymo slėgį. Pirmiausia slėgio signalui pritaikomas CEEMDAN metodas siekiant signalą išskaidyti į vidinio režimo funkcijas (angl. intrinsic mode functions – IMFs). Tuomet naudojant Hilberto ribinį spektrą (angl. Hilbert marginal spectrum – HMS) [13], nustatomi tipinių gedimų požymių vektoriai. Galiausiai nustatomi gauti požymių grupių centrai ir naudojant funkcijų grupavimo algoritmą išskiriami darbo sutrikimai. Apibendrinami rezultatus autoriai teigia, kad jų pasiūlyto metodo naudojimas yra veiksmingesnis negu naudojant akustinės emisijos metodą [6] [14], kai tikslumas siekė 83,3% ar empirinės būsenos išskyrimo metodą [15] su 87,0% tikslumu, nes jų gautų rezultatų rodiklis varijavo tarp 90 – 100% priklausomai nuo atrasto darbo sutrikimo.

Analizuojant dujų reguliavimo vožtuvų darbo sutrikimus taip pat būtų galima sukurti matematinį vožtuvo modelį ir realiuoju laiku apskaičiuojant atsidarymo procentą jį palyginti su esamu. Matematinų modelių kūrimas bei jų sudėtingumas analizuotas skirtinguose moksliniuose darbuose [16 – 17]. Autoriai teigia, kad realios sistemos pritaikymui tokio modelio sukūrimas reikalauja didelių skaičiavimų, papildomų prielaidų taikymo, nes dauguma parametrų yra netiesiniai. Apie matematinio modelio pritaikymą aliarmų formavimui neužsimenama.

Naudojantis išanalizuota literatūra pastebėta, kad dominuoja tyrimai, kuriuose darbo sutrikimai fiksuojami naudojant SVM, neuroninius tinklus, spektrinę išėjimo slėgio signalo analizę. Aptartame [8] darbe, darbo sutrikimui analizuoti reikalinga papildoma diagnostinė įranga akustinių bangų fiksavimui, o tai didina kaštus norint naudoti tokį metodą, o matematinio modelio pritaikymas [16] yra per daug sudėtingas norint jį panaudoti PLV.

Visoje atrastoje mokslinėje literatūroje, reguliavimo sklendžių darbo sutrikimams fiksuoti nėra naudojamas PLV ir analizė atliekama surinkus duomenis bei naudojantis papildoma programine įranga duomenims analizuoti. Dabartinėje techninėje ir programinėje įrangoje, naudojamoje dujų stočių valdyme, praktiškai neįmanoma realizuoti tokių algoritmų dėl didelio resurso poreikio jiems spręsti, todėl tikslas yra sukurti algoritmą ar jų rinkinį, kurį galima realizuoti dujų stočių valdyme naudojamiems PLV.

Kad sukurti praktikoje naudotinus algoritmus PLV lygmenyje, išanalizuoti aliarmų generavimo algoritmai, dujų stoties matuojami parametrai, naudojama techninė ir programinė įranga proceso valdymui bei jos apribojimai.

2. Klasikiniai aliarmų generavimo algoritmai

Aliarmus generuojančių sistemų dokumentavimas ir aliarmavimo standartų sukūrimas prasidėjo 1988 metais. Būta ir ankstesnių pavienių atvejų, kai mėginta susisteminti kylančius aliarmus ar juos kitaip diferencijuoti, tačiau technologijų ribotumas stabdė šios srities vystymąsi. 1999 metais EEMUA („Inžinerinės įrangos ir medžiagų vartotojų asociacija“) išleido pirmąjį aliarmų sistemų tvarkymo gidą – „Publication 191: Alarm systems“ [18]. Šios publikacijos išleidimo tikslas buvo nurodyti tarptautinius reikalavimus dujų, naftos, energetikos ir chemijos pramonėse vykstančių procesų aliarmavimui, jų pasirodymo kiekiui bei kokie jie turėtų būti. Priklausomai nuo pramonės bei joje vykstančių procesų buvo išskirtos ir nurodytos sąlygos kiekvienai sričiai bei aprašyta, kada sistemą galima laikyti informatyvia operatoriui, o kada reikia tobulinti esamą sistemą, kad ji atitiktų standartą.

1 Lentelė. EEMUA siūlomas etalonas aliarmavimo sistemai

	EEMUA etalonas	Naftos ir dujų pramonė	Chemijos pramonė	Energetikos pramonė
Vidutinis aliarmų kiekis per valandą	≤ 6	36	54	48
Vienu metu aktyvių aliarmų kiekis	9	50	100	65
Maksimalus aliarmų kiekis per valandą kritiniu atveju	60	1320	1080	2100
Procentinis pasiskirstymas tarp aliarmų pagal kritiškumą (žemas/vidutinis/ aukštas)	85/15/5	25/40/35	25/40/35	25/40/35

Remiantis EEMUA 191 publikacija, normalaus darbo režimo operatoriaus ekrane neturėtų pasirodyti daugiau negu 6 aliarmai, nes operatorius vieno aliarmo priežastčiai išaiškinti gali užtrukti vidutiniškai 10 minučių. Realybėje tai ne visada įmanoma ir aliarmų kiekiai skiriasi nuo proceso specifikos, tačiau šis etalonas yra puikus pavyzdys, ką turi atitikti sistema.

Aliarmai yra skirstomi į 4 dalis: apatinę avarinę ribą, apatinę perspėjimo ribą, viršutinę perspėjimo ribą ir viršutinę avarinę ribą. Visuomet yra siekiama, kad proceso kintamieji būtų darbinėje riboje, tai yra, tarp apatinės ir viršutinės perspėjimo ribų. Kai kintamieji yra darbiniam diapazone, teigiama, kad procesas vyksta sklandžiai ir be nukrypimų. Peržengus žemesniąją ar aukštesniąją ribą, artėjama prie avarinės situacijos. Dažniausia problema yra ta, kad matuojamas parametras peržengia avarinę ribą ir tuojau pat grįžta į normalaus darbo režimą. Remiantis ISA standartu, matuojama proceso parametrui, kurio matavimo periodas yra T , dažnai pasikartojantys aliarmai laikomi jeigu jie pasikartoja daugiau negu 3 kartus per 60 matavimo periodų [19]. Ši problema sprendžiama taikant signalo vėlinimo algoritmą, įvedant histerezę matuojamam parametrui ties avarine riba, arba naudojant matuojamo parametro filtravimą.

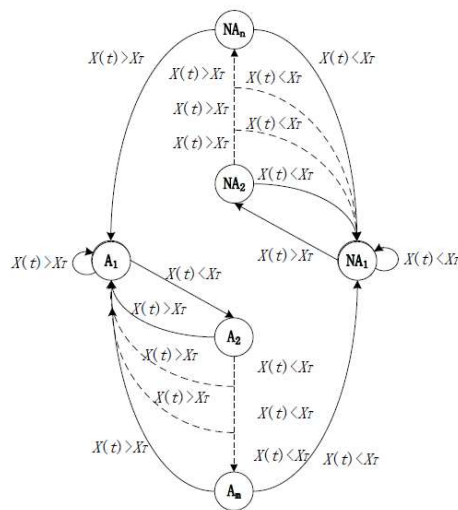
2.1. Duomenų analizės algoritmas taikant signalo vėlinimą

Šio algoritmo oficialia apibrėžimo pradžia ir tiksliniu pritaikymu galima laikyti 1999 metais EEMUA išleistą publikaciją [18]. Ši dokumentacija nurodo kokiems parametrams ir kokio ilgumo užvėlinimus yra geriausia taikyti siekiant išvengti per didelio pasirodančių aliarmų kiekio. Antroje lentelėje pateikiamos 2007 metų papildyto įvado rekomendacijos vėlinimams atitinkamiems proceso parametrams naudoti [20].

2 Lentelė. EEMUA rekomendacijos skirtingų signalų vėlinimui

Signalų tipas	Vėlinimas, s
Srautas	15
Lygis	60
Slėgis	15
Temperatūra	60

Aliarmų generavimas naudojant signalo vėlinimą yra aiškinamas naudojant Markovo grandinės principą. Šis metodas aiškina laikmačio delsimo ir patvirtinimo metodą [21]. Paprastojo vėlinimo laikmačio atveju signalas skirstomas į aliarminę būseną (n) ir ne aliarminę būseną (m). Kai matuojamas signalas $X(t)$ viršija numatytąją kritinę ribą X_T , tuomet sistemos būsena pasikeičia iš NA_1 į NA_2 . Šiuo momentu yra fiksuojama laikmačio pradžia ir sekančiais momentais tikrinama ar būsenos pasikeitimo priežastis išliko tokia pati ar sugrįžo darbinės ribas. Išliekant pasikeitimo priežastis, sekančiu momentu būsena keičiama iš NA_2 į NA_3 ir taip kartojama n kiekį kartų. Laikmačiui pasiekus pabaigą, paskutinėje būsenoje dar kartą tikrinama ar yra išpildoma sąlyga $X(t) > X_T$ ir esant teigiamam rezultatui sistemos būsena pakeičiama į aliarminę būseną A_1 . Jeigu matuojamo parametro reikšmė tenkina lygybę $X(t) < X_T$ bet kuriuo laiko momentu kai nėra pasiekta aliarminė riba, tai sistemos būsena yra grąžinama į pradinę būseną NA_1 ir ciklas yra pradedamas kartoti iš naujo. Kai yra pasiekta aliarminė būseną A_1 , pradedamas atvirkštinis būsenų apsikeitimas ir sąlygos $X(t) < X_T$ tikrinimas, kad būtų sugrįžtama į pradinę NA_1 būseną.



1 Pav. Markovo grandinės principas aliarmų generavime su vėlinimu [21]

Dujų stoties duomenų analizėje tokio algoritmo naudojimas galėtų būti pritaikomas prieš suformuojant aliarmą PLV ir parodant jį operatoriaus ekrane.

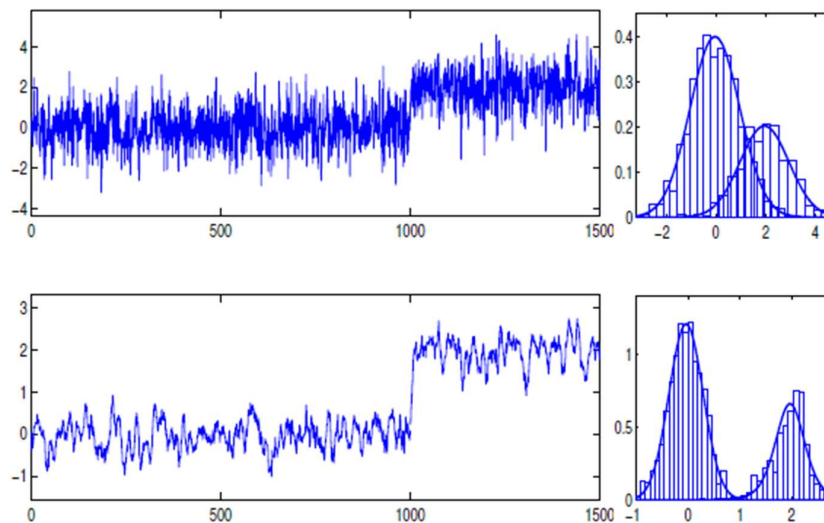
2.2. Duomenų analizės algoritmas taikant duomenų filtravimą

Filtro taikymo priežasčių gali būti keletas: pašalinti papildomą triukšmą, atskirti arba pašalinti dažnines signalo charakteristikas, pakeisti duomenų statistinį pasiskirstymą. Aliarmams generuoti svarbiausia žinoti kada matuojamas parametras perėjo į avarinę būseną ir ar tai nebuvo atsitiktinis atsiradimas, todėl geriausia filtrus naudoti analizuojant parametro išmatuotų duomenų statistinį pasiskirstymą. Kadangi filtrų tipų gali būti daug, [22] apžvelgia plačiausiai naudojamus: slenkančio vidurkio ir slenkančiosios dispersijos filtrus.

Slenkančiojo vidurkio atveju yra pasirenkamas duomenų intervalas n , kuris bus vertinamas ir apskaičiuojamas tame intervale esantis matuojamų duomenų $\{x_1, x_2, \dots\}$ vidurkis :

$$y_i = \frac{1}{n}(x_{i-n+1} + \dots + x_{i-1} + x_i), i = n, n + 1, \dots \quad (1)$$

Atkreipiant dėmesį į tokio filtro panaudojimą iškart galima pamatyti, kad pavieniai duomenų nuokrybiai neturės įtakos aliarmo generavimui, nes visuomet yra skaičiuojama pasirinkto intervalo duomenų vidurkis, kurio reikšmė ir yra naudojama aliarmui generuoti, o kartu yra pašalinamas triukšmas.



2 Pav. Duomenų grafikai palyginimui tarp nefiltruotų (viršuje) ir filtruotų (apačioje) naudojant filtrą su 10 matavimų vidurkio fiksavimu [22]

Ketvirtame paveiksle aiškiai matomas tokio filtro panaudojimo praktiškumas. 2 pav. grafikuose pateikti nefiltruoti duomenys (viršuje) ir filtruoti (apačioje). Esant vidurkiui lygiam 0, duomenų varijavimas siekia nuo -2 iki 2, o dispersija apie vidurkį siekia 0,4. Kai šie matavimai atliekami naudojantis filtravimu, svyravimų amplitudė sumažėjo iki -1 ir 1, o dispersija išaugo iki 1,2. Tokie patys pasikeitimai užfiksuoti matuojamam parametrai padidėjus.

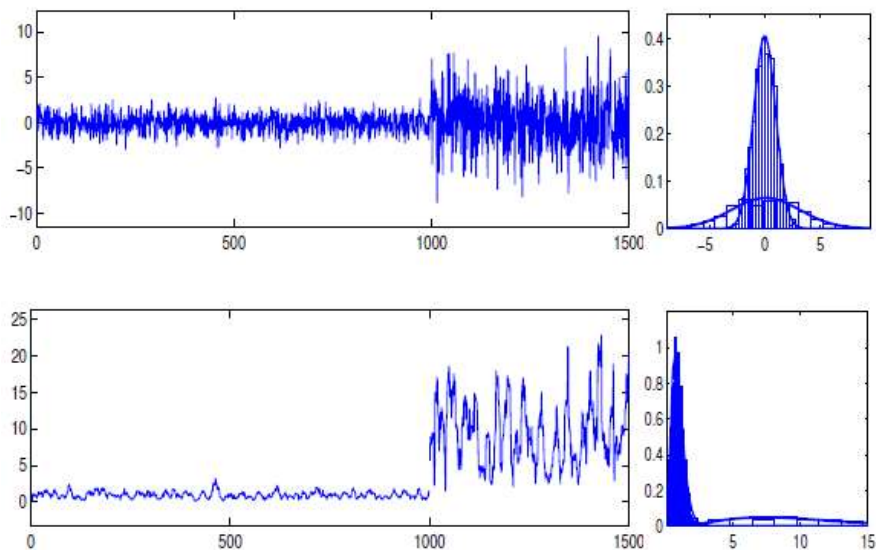
Galima gauti dar geresnius rezultatus su mažesniais svyravimais jeigu būtų naudojama didesnė matuojamo parametro vidurkio imtis. Duomenys gautųsi su dar mažesne svyravimų amplitude ir didesne dispersija, tačiau didesniai vidurkio apskaičiavimui reikalinga daugiau PLV atminties. EEMUA nėra standartizavusi kokios duomenų imties yra optimaliausia matuojamiems parametrams.

Imties pasirinkimas dažniausiai atliekamas bandymų ir klaidų metodu kiekvienam procesui atskirai, nes gali skirtis parametrų nuskaitymo greičiai bei svarba procesui.

Slenkančios dispersijos filtrą vertą naudoti tuomet kai proceso kintamojo vertės normalaus darbo metu varijuoja apie tą patį vidurkį, kaip ir avarinio darbo metu, tik su mažesne amplitude. Tokiu atveju yra sunku pasakyti kada pereinama į avarinio režimo sąlygas, nes signalo užvėlinimo ar slenkančiojo vidurkio filtro naudojimas nenustato didesnio pasikeitimo procese.

$$y_i = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^{n-1} (x_{i-k} - \bar{x}^2), i = n, n + 1, \dots \quad (2)$$

Slenkančiosios dispersijos filtrui skaičiuoti naudojama (2) formulė, kur $\{x_1, x_2, \dots\}$ yra matuojami proceso duomenys, o \bar{x} – duomenų vidurkis imtyje n .



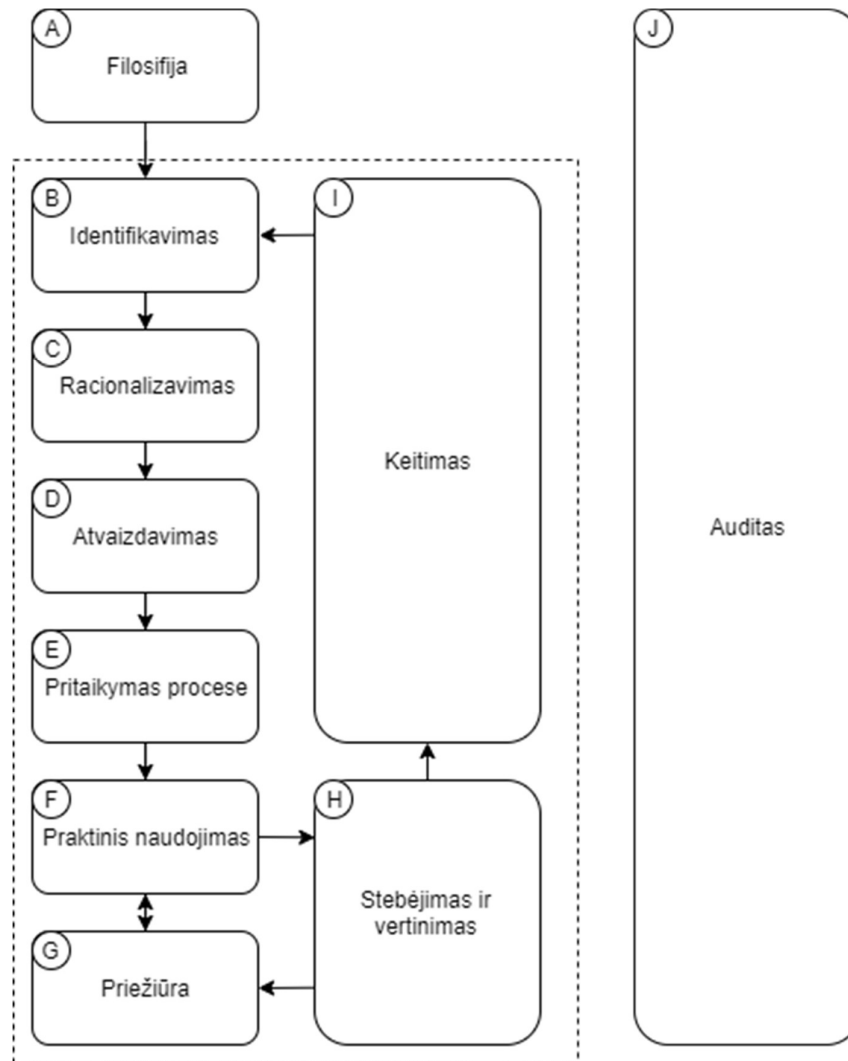
3 Pav. Duomenų grafikai palyginimui tarp nefiltruotų (viršuje) ir filtruotų (apačioje) naudojant slenkančiosios dispersijos filtrą su 10 matavimų vidurkio fiksavimu [22]

Iš 3 pav. pateiktų grafikų autoriai teigia, kad apačioje esantys filtruoti duomenys histogramoje aiškiai parodo duomenų pasiskirstymą juose naudojant filtravimą [22]. Viršutinėje 3 pav. dalyje matoma, kad duomenų pasiskirstymas nuo 0 iki 1000 matavimų ir nuo 1000 iki 1500 duoda persidengiančią dispersiją tik su didesne amplitude, todėl įvertinti kada matuojamas parametras peržengė normalaus darbo režimo sąlygas yra sudėtinga, tačiau pritaikius slenkančiosios dispersijos filtrą, apatinėje histogramoje matyti, kad normalaus darbo režimo metu vidurkis yra apie 0,5, o normalaus darbo režimo slenksčiu galima laikyti 2,5.

Naudojant šį algoritmą dujų stoties parametrų fiksavimui ir sekančiam panaudojimui kuriant dujų reguliavimo sklendžių darbo sutrikimo fiksavimo algoritmus galima išvengti pereinamojo proceso iššauktų staigių verčių pasikeitimo bei trikdžių.

3. Pažengę duomenų analizės algoritmai

Remiantis pasaulyje pripažintais reglamentais ir standartais tokiais kaip ANSI/ASI 18.2 [19] ar EEMUA 191 [18] publikacija, kuriame pažangesni duomenų analizės algoritmai kurie geba įvertinti proceso parametrus ne tik duotuoju momentu arba mažame laiko intervale, bet analizuoja praeities įvykius ieškant panašumų, grupuoja pagal svarbą bei vietą procese. Standartas ANSI/ASI 18.2 nurodo kaip turi vykti aliarmų atrinkimas, panaudojimas procese, jų pasirodymo dažnumą, informatyvumą.



4 Pav. ANSI/ASI 18.2 standarto aliarmų sukūrimo, naudojimo ir tikrinimo algoritmas

Standartas sudarytas iš 10 etapų, kurie apibrėžia aliarmų generavimą.

3 Lentelė. ANSI/ASI 18.2 standarto žingsniai kuriant aliarmų sistemą

Etapas	Veikla etape
Aliarmo filosofija	Procesas dokumentuojamas siekiant išsiaiškinti kokia aliarmų sistema būtų tinkamiausia.
Identifikacija	Išsirenkami parametrai ar jų grupės kurie bus naudojami aliarmams generuoti.
Racionalizacija	Tikrinama ar identifikuoti aliarmai atitinka aliarmų filosofiją, ar galima juos grupuoti.

Atvaizdavimas	Remiasi identifikacijos ir racionalizavimo etapu, kad būtų nuspręsta kaip teisingai ir informatyviai atvaizduoti aliarmą jog operatorius jį suprastų bei žinotų ką reikia atlikti norint pašalinti priežastį.
Pritaikymas procese	Aliarmas yra pradedamas naudoti procese pradedant nuo sistemos testavimo, paleidimo ir derinimo darbų.
Praktinis naudojimas	Atlikus paleidimo ir derinimo darbus, aliarmas paliekamas aktyviu.
Priežiūra	Aliarmas išjungiamas ar padaromas neaktyviu dėl papildomų testavimų ar esant gedimams.
Stebėjimas ir vertinimas	Aliarmavimo sistema nuolatos prižiūrima ir tikrinama ar atitinka numatytą sistemos filosofiją.
Keitimas	Esant nuokrypiams nuo sistemos filosofijos, aliarmavimo sistema papildoma ar pakeičiama pagal iš anksto numatytą tvarką.
Auditas	Periodiškai tikrinamas aliarmų sistemos panaudojimas, efektyvumas bei gaunama nauda.

Šis standartas taip pat nurodo metodus, kurie priskiriami prie pažengusių duomenų analizės algoritmų:

- Informacijos susiejimas
- Logika paremtas aliarmavimas
- Aliarmų savybių pakeitimas
- Būsenų pasikeitimo aliarmavimas
- Aliarmavimas remiantis matematinio sistemos modeliu
- Pirmojo pasirodžiusio aliarmo fiksavimas

3.1. Būsenų pasikeitimo aliarmavimas

Naudojant šį metodą aliarmai generuojami remiantis proceso ar konkretaus įrenginio būseną. Tai yra kompleksinis būdas, nes esant skirtingoms būsenoms generuojami dalinai ar visai skirtingi aliarmai, kad būtų sumažintas jų kiekis, o patys aliarmai taptų informatyvesni konkrečioms situacijoms. Keičiantis proceso eigai: procesui vykstant, sustojant ar atsitikus avarinei situacijai, skirtingos parametrų vertės gali teikti visiškai skirtingą informatyvumą. Tokiais atvejais reikia keisti avarines ribas jas praplečiant ar išvis panaikinant. Šio algoritmo kompleksiskumas pasireiškia tuomet, kai esant skirtingoms proceso būsenoms yra naudojami skirtingi aliarmų ruošiniai su tai būsenai būdingais parametrais. Procesas gali būti grupuojamas į pasirinktas darbo režimų grupes:

- Įrenginio ar proceso išjungimas. Šioje būsenoje įrenginys, kaip pavyzdys reguliavimo sklendė, yra uždaryta, todėl prie šių sąlygų neverta generuoti aliarmų susijusių su darbo tašku, nes procesas nevyksta.
- Proceso paleidimas arba stabdymas. Šioje būsenoje matuojami parametrai gali greitai kisti, kaip pavyzdys – reguliavimo sklendės atsidarymo procentas arba srautas, todėl generuoti aliarmų susijusių su darbo tašku nėra prasmės, nes vėluojant duomenų nuskaitymui gali būti gauti iškreipti rezultatai.
- Normalaus darbo režimas. Šio režimo metu būtų galima generuoti aliarmus fiksuojant pasiektą nusistovėjusią būseną.

Pagal pasirinktas darbo režimo grupes matyti, kad reikia naudoti skirtingus ribinių parametrų rinkinius priklausančius nuo proceso būsenos.

Būsenų pasikeitimas gali vykti 3 būdais: rankiniu, pusiau rankiniu ir automatiniu. Rankiniu būdu operatorius pats nurodo konkrečiam įrenginiui kokioje būsenoje yra sistema. Pusiau rankiniu būdu programa pasiūlo pervesti įrenginį į kitą būseną, o operatoriui lieka tik patvirtinti ar atmesti šį pasiūlymą. Būsenoms keičiantis automatiškai, programa pati nusprendžia iš viso proceso eigos ir sistemų bei posistemų veikimo, kokiai būsenai priskirti įrenginį ar jo dalį.

Dujų srauto reguliavimo procese būtų galima skaidyti sistemą į panašias būsenas: sustojimas, pereinamasis procesas, normalaus darbo režimas, avarinis stabdymas. Kadangi ieškomas reguliavimo sklendės sugedimo/išsidėvėjimo momentas, tikslingiausia būtų formuoti aliarmus esant normalaus darbo režime išvengiant pereinamojo proceso momentinio duomenų iškraipymo.

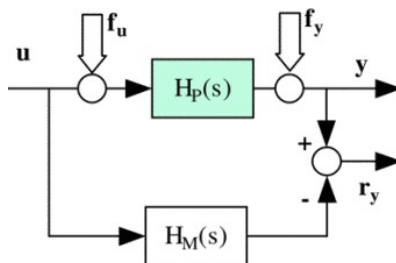
3.2. Aliarmavimas remiantis matematinio sistemos modeliu

Matematinio modelio kūrimas ir jo lyginimas su realiu sistemos procesu aliarmams generuoti yra vienas pirmųjų metodų naudojamų praktikoje. Sistemos modelis nebūtinai turi būti įėjimo ir išėjimo duomenų tarpusavio ryšio nustatymas, išskaičiavimas, tai taip pat gali būti modelis grįstas iš anksto žinomomis žiniomis, todėl sistemos modelių kūrimas skirstomas į dvi grupes: kokybinius ir kiekybinius modelius [23].

4 Lentelė. Modelių kūrimo metodai aliarmų generavimui.

Kokybiniai modelių sudarymo metodai	Kiekybiniai modelių sudarymo metodai
Pagrįstas žiniomis apie proceso parametrus	Stebėtuvų, pariteto santykių, Kalmano filtro ir parametrų įvertinimo metodai
Kokybinių parametrų analizė	Neuroniniai tinklai
Priežastinis ir abstrakcijos hierarchijos metodai	Statistinės kokybės kontrolė

Kiekybiniai modelių metodai, tokie kaip stebėtuvų, Kalmano filtro ar pariteto santykių naudojimas remiasi proceso matematinio aprašymu. Matematinis modelis dažniausiai būna pirmos eilės ir jo panaudojimas tinkamas daug informacijos turinčioms sistemoms, kurios dažniausiai būna tiesinės, todėl šie metodai dažnai vadinami analitiniais metodais. Žinant sistemą sudarančius proceso įėjimo ir išėjimo kintamuosius bei patį procesą, jis aprašomas energijos mainų formulėmis taip susiejant įėjimo bei išėjimo duomenis. Remiantis naudojamomis formulėmis galima apskaičiuoti ir papildomus, fiziškai nematuojamus parametrus, kuriuos taip pat galima naudoti sistemos būsenos sekimui. Pariteto santykių skaičiavimo metode [24] pirmos eilės sistemos modelis simuliuojamas lygiagrečiai su realia sistema ir skaičiuojamos paklaidos tarp modelio išėjimo signalų ir atitinkamų proceso išėjimo signalų. Sistemos ar konkretaus prietaiso būsena nustatoma lyginant išėjimo signalų liekanų dydį su numatyta ribine reikšme.



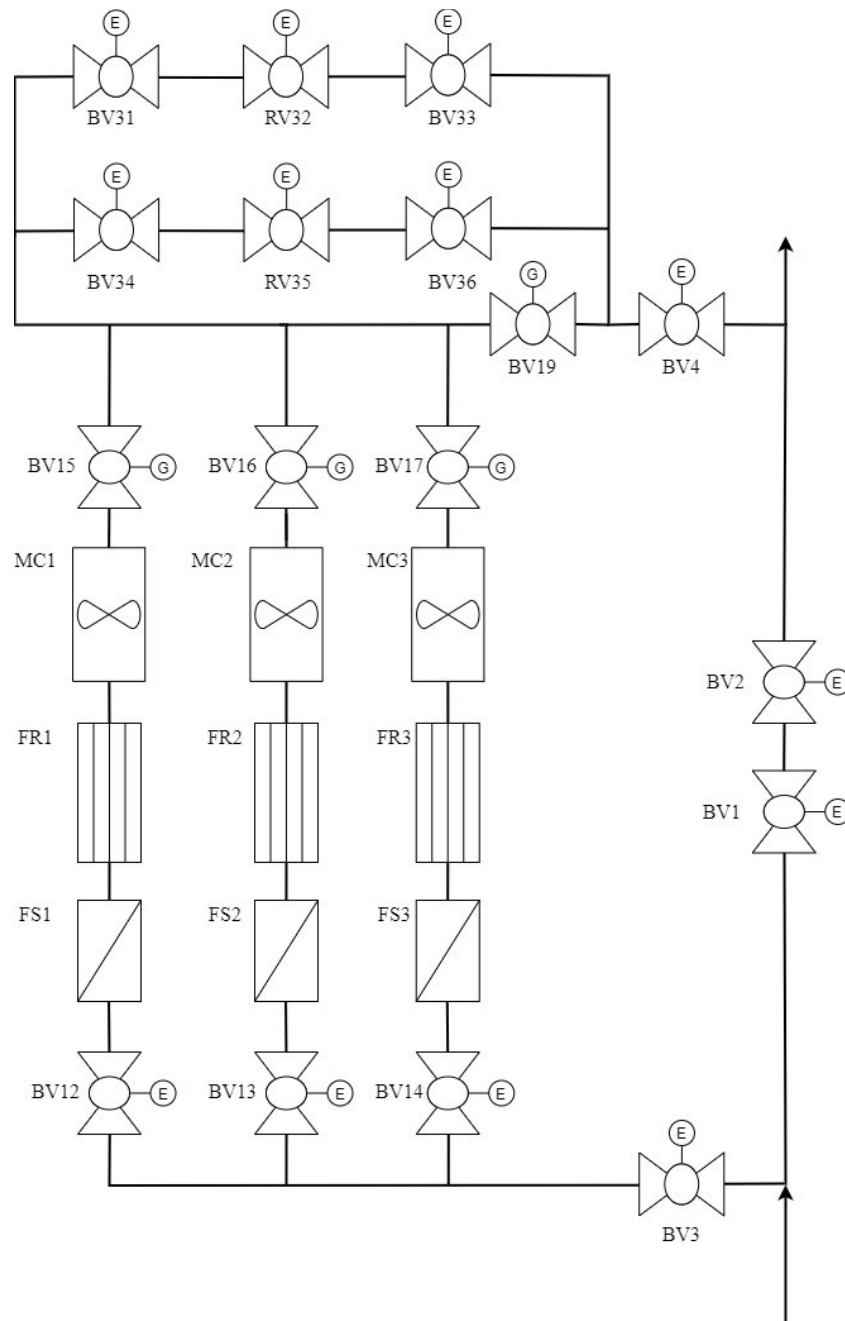
5 Pav. Realios sistemos (H_p) ir modelio (H_m) naudojimas paritetų santykių skaičiavime.

Kokybiniai modelių sudarymo metodai remiasi iš anksto suteiktomis žiniomis apie procesą: kokios jo vertės būna prie tam tikrų sąlygų, kaip sistema reaguoja į tam tikrus įvykius ir panašiai. Žiniomis pagrįsti modeliai gali būti skirstomi į negiliomis žiniomis paremtą modelį ir giliomis, eksperto, žiniomis paremtą modelį. Negiliomis žiniomis pagrįstas modelis sudaromas remiantis žmogiškąja patirtimi, dažniausiai operatorių, kurie procesą išmano ir žino prie kokių sąlygų galima tikėtis parametrų nuokrypių nuo darbinių ribų. Eksperto žiniomis pagrįstas modelis remiasi išankstiniais skaičiavimais, semantiniais tinklais.

Analizuojant dujų stoties veikimą PLV lygmenyje būtų galima realizuoti modifikuotą pariteto santykių modelį, kai apskaičiuoti darbo taškai esamoms proceso sąlygoms yra lyginami su vėliau pasiekiamais tais pačiais darbo taškais ir išėjime palyginti ieškomus signalus.

4. Dujų stoties technologinis procesas

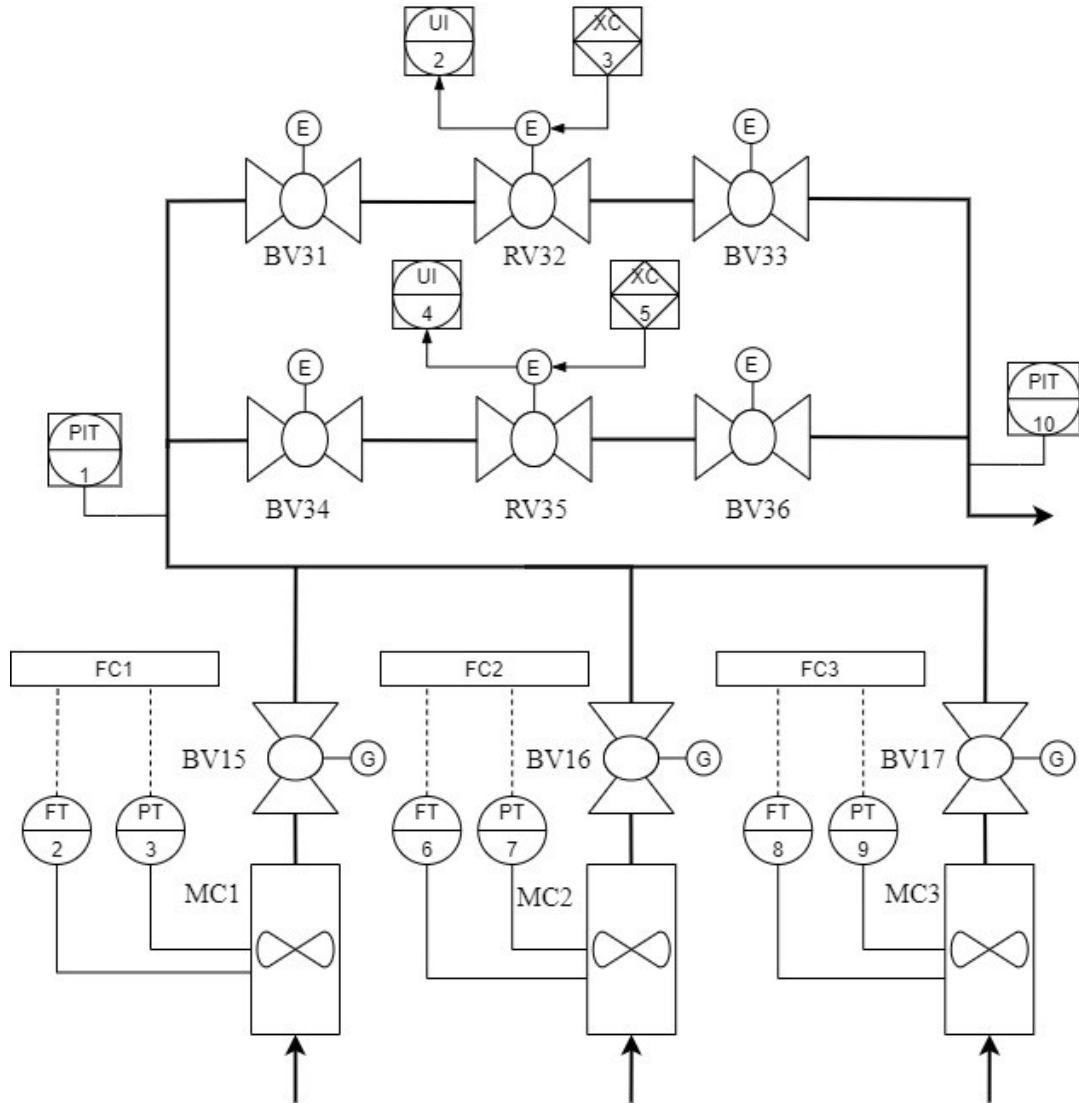
Šiame darbe nagrinėjamas dujų stoties technologinis procesas pavaizduotas 6 pav.



6 pav. Dujų stoties vamzdyno ir prietaisų diagrama

Dujų stotį sudaro įėjimo ir išėjimo rutulinės sklendės BV3 ir BV4, trys matavimo linijos, kurių kiekvieną sudaro įėjimo sklendė (BV12, BV13, BV14), filtras (FS1, FS2, FS3), dujų srauto tiesintuvas (FR1, FR2, FR3), dujų srauto matavimo įtaisas (MC1, MC2, MC3) ir išėjimo sklendė (BV15, BV16, BV17). Toliau įrengtos dvi redukavimo linijos, kurių kiekvieną sudaro įėjimo sklendė (BV31, BV34), reguliavimo sklendė (RV32, RV35) ir išėjimo sklendė (BV33, BV36). Taip pat įrengta redukavimo linijų apvadinė sklendė BV19, kuri normaliu darbo režimu nenaudojama.

Kuriant algoritmus reguliavimo sklendžių stebėjimui labai svarbu atsižvelgti į visą technologinį procesą, siekiant žinoti dėl ko gali kilti problemos. Tai gali sąlygoti filtro užsinešimas, vamzdyno suvirinimo brokas, nusidėvėjusios sklendės, netinkamas srauto tiesintuvo panaudojimas. Konkrečiu atveju filtro užsinešimas tiesioginės įtakos reguliavimui neturi, nes srautas matuojamas turbinos tipo matavimo įtaise, kuris technologinėje schemeje yra už filtrų.



7 pav. Redukavimo linijų automatizavimo schema

7 pav. pateiktoje automatizavimo schemeje išskirta nagrinėjamos dujų stoties dalis. Reguliavimo sklendės RV32 ir RV35 valdomos PLV pagalba priklausomai nuo matuojamo suminio srauto iš srauto kompiuterių (FC1, FC2, FC3) ir priklausomai nuo įėjimo ir išėjimo slėgių (PIT 1 ir PIT10). Slėgių skirtumas skaičiuojamas atimant išėjimo slėgį iš įėjimo slėgio ir normalaus darbo metu šis skirtumas turi būti nemažesnis už 1,0 barą. Dujų stotis suprojektuota darbiniam 25 – 55 barų įėjimo slėgiui, numatytas išėjimo slėgis 10 – 40 barų, o galimas maksimalus srautas – 300000 m³/h.

4.1. Reguliavimo vožtuvo veikimas

Gamtinių dujų matavimo stotyje pratekantis dujų srautas valdomas reguliavimo vožtuvu, kurį sudaro rutulinis čiaupas ir pavara. Pavara valdoma 4..20mA srovės kanalu iš PLV kai norima procentinė reikšmė konvertuojama analoginio išėjimo modulio pagalba į srovę, o pavara pasuka rutulinį čiaupą pagal užduotą procentinę reikšmę.



8 pav. Tiriamas rutulinis vožtuvas ir pavara

Dujų srauto valdymo technologinį procesą sudaro dvi Auma ACEXC 01.2 pavaros ir valdomi 300mm skersmens rutuliniai vožtuvai.

4.2. Naudojama įranga

Šioje dujų stotyje naudojama Schneider Electric techninė ir programinė įranga procesui valdyti, o proceso parametrams fiksuoti naudojama Emerson ir Auma techninė įranga.

5 lentelė. Naudojama įranga

Atstovas	Įrangos tipas	Įranga	Versija	Paskirtis
Schneider Electric	Techninė	Modicon M580	M584040	Proceso valdymas
Schneider Electric	Programinė	Unity Pro XLS	13.1	Programavimas
Emerson	Techninė	Rosemount 3051T	-	Slėgio matavimas
Emerson	Techninė	Floboss 600+	-	Srauto matavimas
Auma	Techninė	Acexc 1.2	-	Reguliavimo sklendės valdymas

Analizuojant naudojamą programinę ir techninę įrangą susidurta su jos apribojimais sukuriant duomenų masyvus. Unity Pro XLS programinė įranga automatiškai apriboja didžiausią masyvą iki 65535 baitų dydžio, o tai reiškia, kad norint naudotis tam tikrais paieškos principais gali reikėti koreguoti masyvų dydį, didinti ar mažinti paklaidas.

5. Duomenų analizė

Dujų stoties reguliavimo sklendės darbo sutrikimui analizuoti ir fiksuoti reikalingi 4 technologinio proceso parametrai: reguliavimo sklendės atsidarymo procentas, dujų srautas, įėjimo ir išėjimo slėgiai. Naudojant šiuos parametrus galima apskaičiuoti slėgio perkrytį tenkantį reguliavimo sklendei ir fiksuoti skirtingus darbo režimus.

Naudojamiems istoriniams duomenims analizuoti ir algoritmams testuoti naudojama Schneider Electric ir Mathworks programinė ir techninė įranga.

6 lentelė. Duomenims analizuoti ir algoritmams testuoti naudojama įranga

Atstovas	Įrangos tipas	Įranga	Versija	Paskirtis
Schneider Electric	Techninė	Modicon M580	M582040	Algoritmų testavimui
Schneider Electric	Programinė	Unity Pro XLS	13.1	Algoritmų kūrimui
MathWorks	Programinė	MATLAB	R2020a	Istorinių duomenų analizei ir algoritmų kūrimui

Reguliavimo sklendžių veikimui išanalizuoti pasirinkti 2-ejų metų istoriniai duomenys nuo jų eksploatacijos pradžios.

7 lentelė. Naudotų istorinių duomenų pavyzdys

Data	Laikas (hh:mm:ss)	Srautas (m ³ /h)	Įėjimo slėgis (bar)	Išėjimo slėgis (bar)	Slėgio perkrytis (bar)	RV32 padėtis (%)	RV35 padėtis (%)
2018-01-01	00:00:00	80040	35,74	31,96	3,78	40,1	0,0
2018-01-02	01:00:00	80033	35,77	31,98	3,79	40,1	0,0
2018-01-03	02:00:00	79940	35,80	32,01	3,79	40,1	0,0
2018-01-04	03:00:00	79849	35,83	32,05	3,78	40,1	0,0

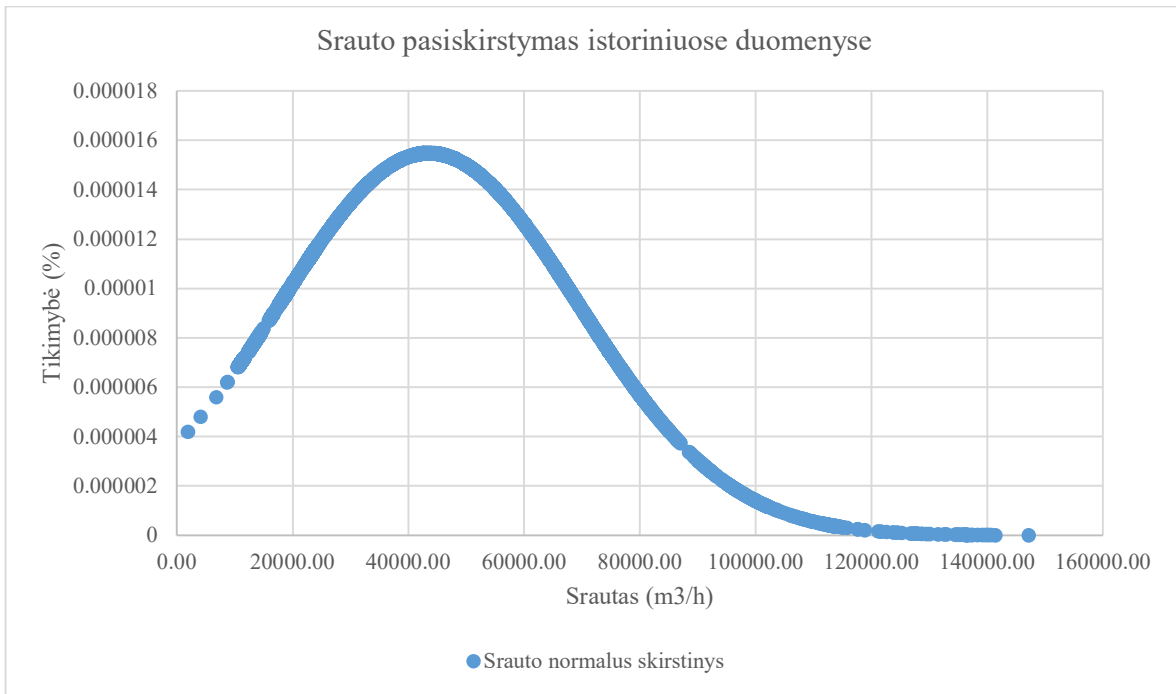
Kiekvienam parametrai naudota 17519 unikalių įrašų, kurie tarpusavyje susieti ta pačia data ir laiku. Duomenų periodiškumas pasirinktas kas 1 valandą dėl ilgos pereinamojo proceso laiko pastoviosios. Dujų stotis yra magistralinio dujotiekio dalis ir vyrauja pastovus dujų srautas pasiekus nuostatą.

5.1. Minimalių ir maksimalių duomenų rėžių parinkimas darbo taškų formavimui

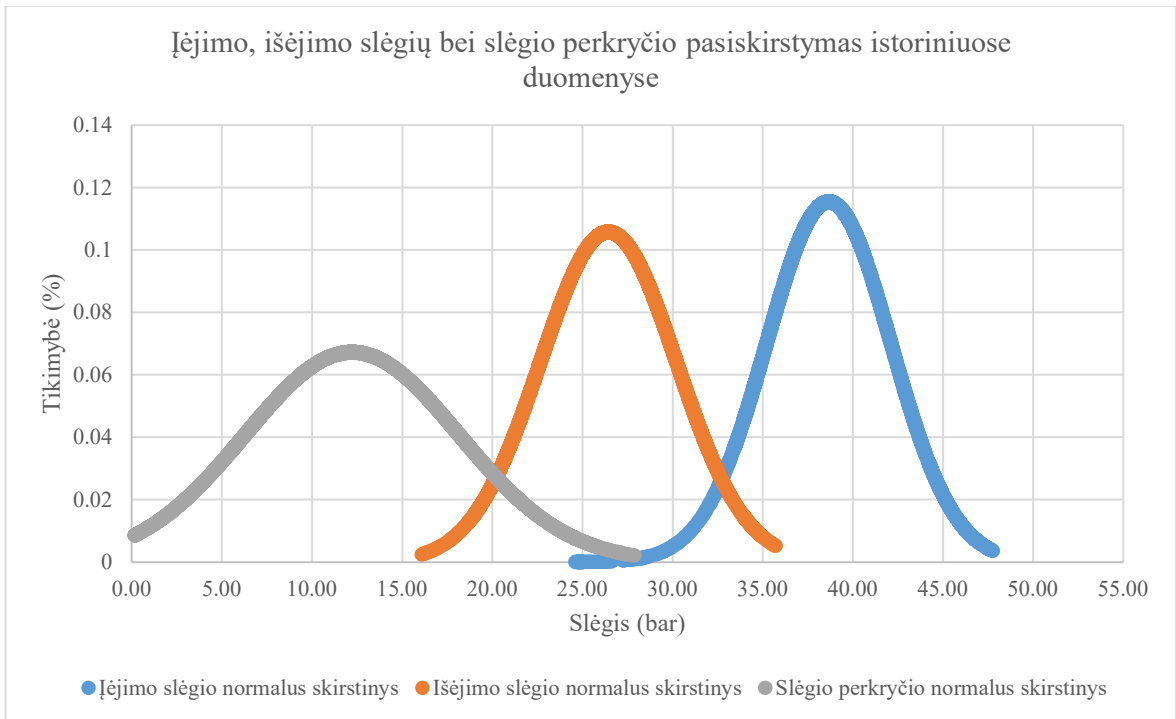
Kadangi technologinį procesą sudaro 2 lygiagrečios reguliavimo sklendės, kurios negali dirbti vienu metu esant normaliam darbo režimui, todėl duomenys išskirti į dvi dalis, priklausomai nuo reguliavimo sklendės atsidarymo procento.

5.1.1. Pirmos reguliavimo sklendės duomenų rėžiai

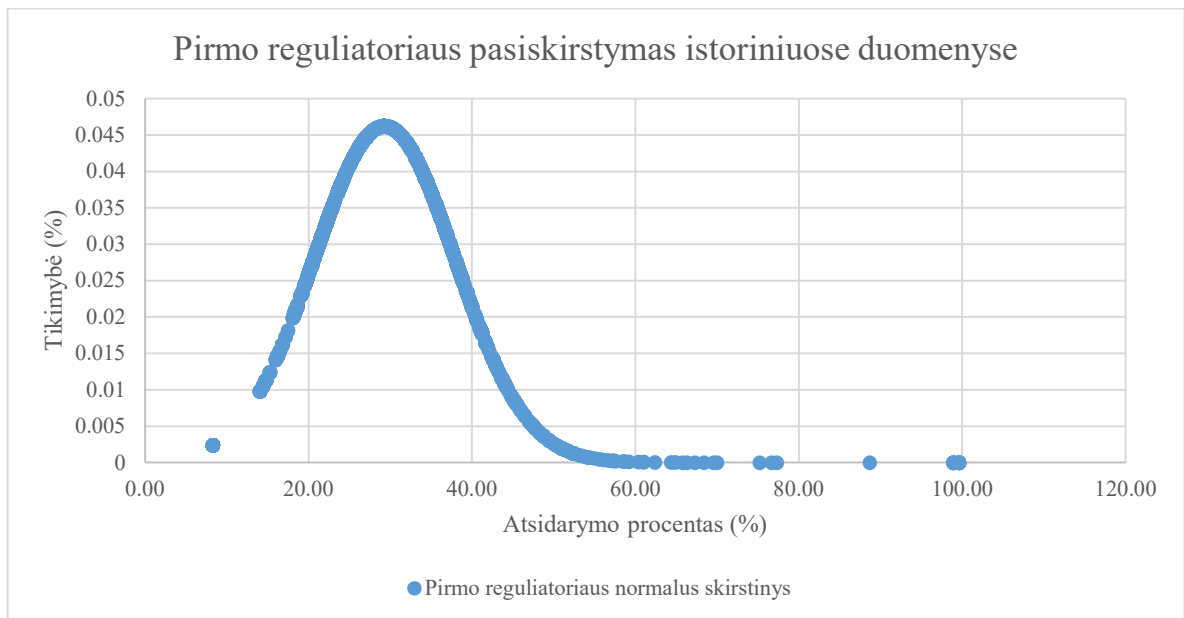
Iš dviejų metų istorinių duomenų išrinkti duomenys kai pirmos reguliavimo sklendės atsidarymo procentas yra didesnis už 0,0%. Pirmiausia nubrėžti grafikai visiems naudojamiems parametras, siekiant užfiksuoti jų pasiskirstymą, minimalias ir maksimalias reikšmes.



9 pav. Srauto pasiskirstymas istoriniuose duomenyse dirbant pirmam reguliatoriui



10 pav. Slėgių pasiskirstymas istoriniuose duomenyse dirbant pirmam reguliatoriui



11 pav. Pirmo reguliatoriaus atsidarymo procento pasiskirstymas istoriniuose duomenyse

Iš gautų grafikų pastebėta, kad visų parametų kitimas darbo metu yra normalaus pasiskirstymo kreivės formos, todėl norint sumažinti kitimo režius galima pritaikyti normalaus skirstinio savybes. Laikant, kad X yra bet kuris parametras iš normalaus skirstinio, μ – matuojamo parametro vidurkis, σ – matuojamo parametro standartinis nuokrypis, galima apibrėžti tikimybes, kad matavimas priklauso istorinių duomenų aibei.

$$\Pr(\mu - 1\sigma \leq X \leq \mu + 1\sigma) \approx 0,6827 \quad (3)$$

$$\Pr(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) \approx 0,9545 \quad (4)$$

$$\Pr(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) \approx 0,9973 \quad (5)$$

Darant prielaidą, kad duomenys yra normalaus pasiskirstymo, surastos kiekvieno naudojamo parametro minimalios, maksimalios reikšmės, vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir perskaičiuotos minimalios ir maksimalios kitimo reikšmės naudojantis (4) formule. Ribinių reikšmių perskaičiavimui naudojama $\mu \pm 2\sigma$ taisyklė, kad sumažinti retai pasirodančių reikšmių kiekį.

8 lentelė. Matuojamų parametų ribinės reikšmės

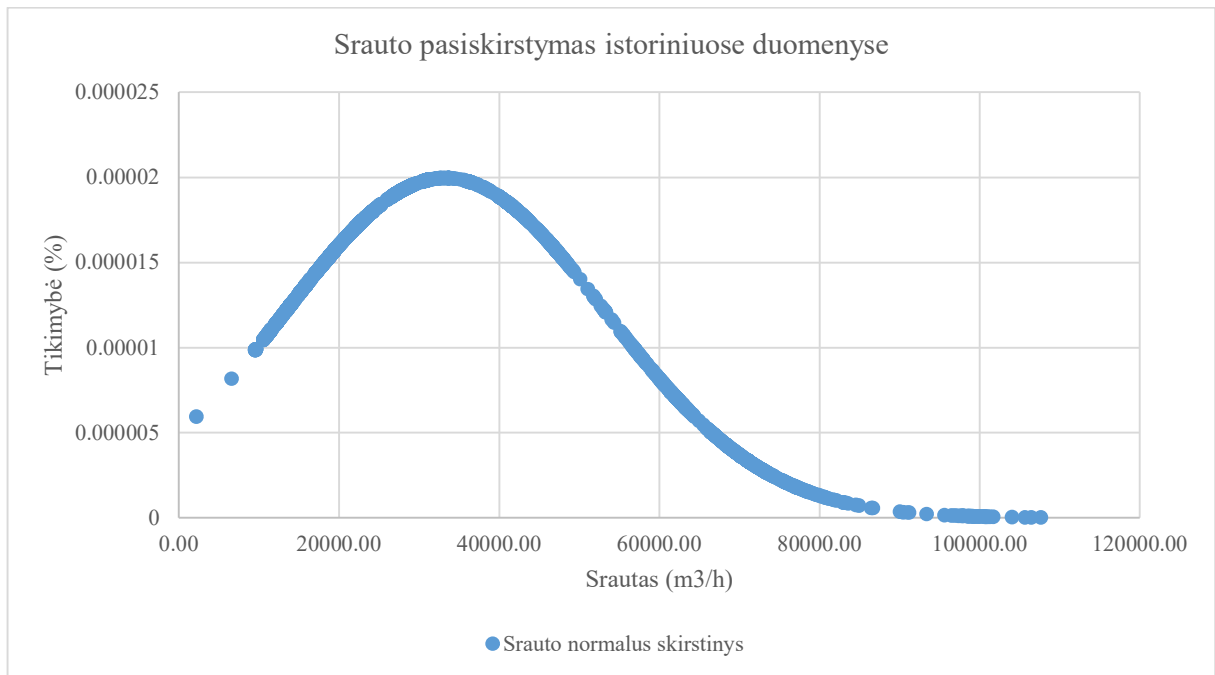
Parametras	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Vidurkis (μ)	Standartinis nuokrypis (σ)	$\mu \pm 2\sigma$	
					Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė
Srautas	1928,72 m ³ /h	147156,34 m ³ /h	43565,21 m ³ /h	25759,05 m ³ /h	15000,0 m ³ /h	95083,30 m ³ /h
Iėjimo slėgis	24,61 bar	47,78 bar	38,67 bar	3,457 bar	31,76 bar	45,59 bar
Išėjimo slėgis	16,09 bar	35,72 bar	26,45 bar	3,773 bar	18,90 bar	33,99 bar
Slėgio perkrytis	0,18 bar	27,88 bar	12,23 bar	5,937 bar	1,0 bar	24,10 bar
Atsidarymo procentas	8,3 %	99,6 %	29,31 %	8,628 %	12,05 %	46,57 %

Srauto minimali perskaičiuota reikšmė gaunama mažesnė už $0,0 \text{ m}^3/\text{h}$, tačiau dujų stoties technologinis aprašymas nurodo, kad stoties normalaus darbo režimas laikomas kai dujų srautas yra nemažesnis nei $15000,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

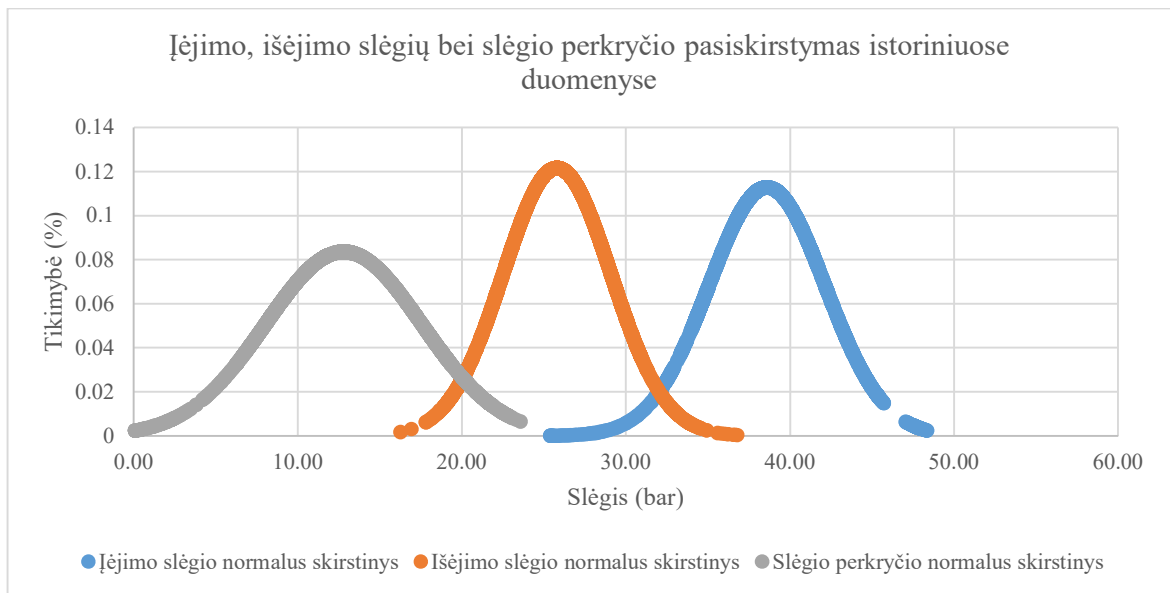
Slėgio perkryčio minimali reikšmė naudojant $\mu - 2\sigma$ taisyklę gaunama $0,356 \text{ bar}$, tačiau normalus darbo režimas galimas slėgio perkryčiui esant didesniai negu 1 bar , todėl perskaičiuota minimali reikšmė pakoreguota.

5.1.2. Antros reguliavimo sklendės duomenų režiai

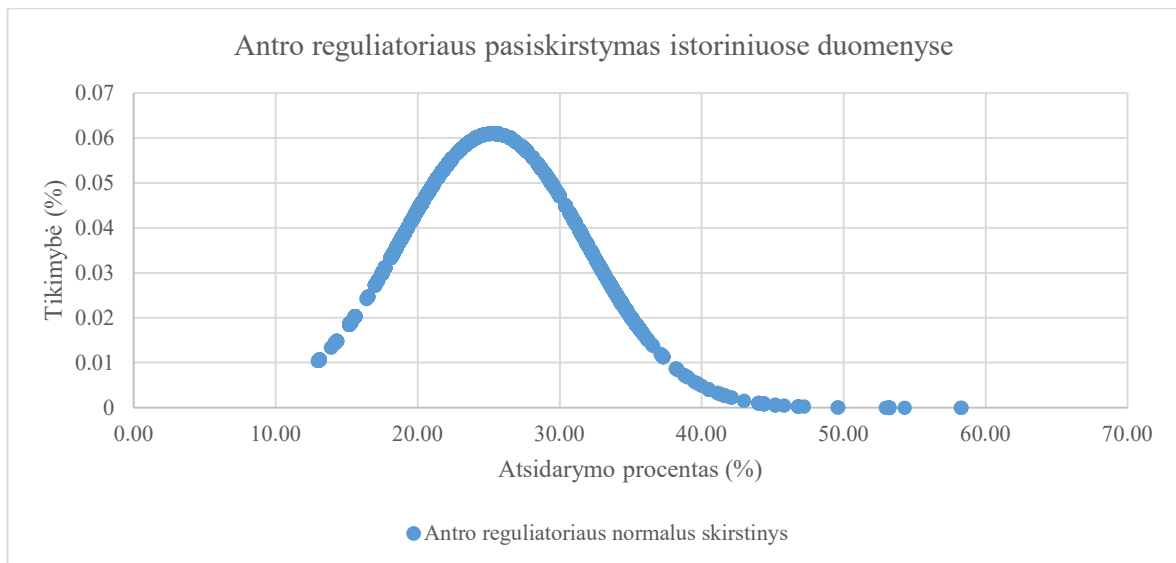
Antros reguliavimo sklendės duomenų režiai parenkami analogiškai kaip ir pirmai reguliavimo sklendei.



12 pav. Srauto pasiskirstymas istoriniuose duomenyse dirbant antram reguliatoriui



13 pav. Slėgių pasiskirstymas istoriniuose duomenyse dirbant antram reguliatoriui



14 pav. Antro reguliatoriaus atsidarymo procento pasiskirstymas istoriniuose duomenyse

9 lentelė. Matuojamų parametų ribinės reikšmės

Parametras	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Vidurkis (μ)	Standartinis nuokrypis (σ)	$\mu \pm 2\sigma$	
					Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė
Srautas	2182,13 m ³ /h	107643,84 m ³ /h	33285,94 m ³ /h	19985,7 m ³ /h	15000,0 m ³ /h	73257,31 m ³ /h
Iėjimo slėgis	25,38 bar	48,35 bar	38,60 bar	3,535 bar	31,53 bar	45,67 bar
Išėjimo slėgis	16,27 bar	36,79 bar	25,80 bar	3,278 bar	19,25 bar	32,36 bar
Slėgio perkrytis	0,09 bar	23,58 bar	12,80 bar	4,769 bar	3,26 bar	22,34 bar
Atsidarymo procentas	13,0 %	58,3 %	25,3 %	6,539 %	12,22 %	38,37 %

Srauto minimali perskaičiuota reikšmė gaunama mažesnė už 0,0 m³/h, tačiau dujų stoties technologinis aprašymas nurodo, kad stoties normalaus darbo režimas laikomas kai dujų srautas yra nemažesnis nei 15000,0 m³/h.

5.1.3. Bendri ribiniai parametrų režiai

Kadangi sistemoje yra dvi reguliavimo sklendės su skirtingais parametrų režiais, tai kuriant algoritmus reikia atsižvelgti į abiejų sklendžių režius.

Vadovaujantis technologiniu procesu ir valdymo principais pastebėta, kad pasirinktos minimalios ir maksimalios ribinės reikšmės turi tenkinti ir papildomą sąlygą. Kadangi slėgio perkrytis skaičiuojamas iš įėjimo slėgio atimant išėjimo slėgį, vadinasi ribinių reikšmių skirtumai turi būti mažesni arba lygūs slėgio perkryčio ribinėms reikšmėms.

$$\Delta p_{maksimalus} = p_{\text{įėjimo maksimalus}} - p_{\text{išėjimo minimalus}} \quad (6)$$

$$\Delta p_{minimalus} = p_{\text{įėjimo minimalus}} - p_{\text{išėjimo maksimalus}} \quad (7)$$

10 lentelė. Slėgio perkryčio sąlyga

Sąlyga	Apskaičiuota	Realus Δp	Matavimo vienetas
$P_{\text{įėjimo_maksimalus}} - P_{\text{išėjimo_minimalus}}$	27,00	24,00	bar
$P_{\text{įėjimo_minimalus}} - P_{\text{išėjimo_maksimalus}}$	-3,00	1,00	bar

Kadangi realus slėgio perkryčio režis yra 7 barais mažesnis negu apskaičiuotas, vadinasi 7 barais galima sumažinti įėjimo arba išėjimo slėgio kitimo režį. Kad tai padaryti, išrinkta po 3 artimiausias kiekvieno parametro reikšmes minimaliam ir maksimaliam režiu bei pateiktos tų reikšmių tikimybės normalaus darbo metu. Lentelėje paryškintai pažymėtos 7 mažiausios tikimybės.

11 lentelė. Įėjimo ir išėjimo slėgių tikimybės

Parametras	Reikšmė	Tikimybė	Matavimo vienetas
Įėjimo slėgis	31,00	0,01	bar
	32,00	0,017	
	33,00	0,032	
	44,00	0,034	
	45,00	0,021	
	46,00	0,013	
Išėjimo slėgis	19,00	0,014	bar
	20,00	0,024	
	21,00	0,037	
	32,00	0,036	
	33,00	0,023	
	34,00	0,013	

Išrinkus minimalias ir maksimalias perskaičiuotas parametrų reikšmes bei atsižvelgiant į papildomas sąlygas sudaryta bendra ribinių parametrų režių lentelė.

12 lentelė. Bendra ribinių režių lentelė

Parametras	Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė	Matavimo vienetas
Srautas	15000,0	100000,0	m ³ /h
Įėjimo slėgis	31,0 (33,0)	46,0 (44,0)	bar
Išėjimo slėgis	19,0 (20,0)	34,0 (32,0)	bar
Slėgio perkrytis	1,0	24,0	bar
Atsidarymo procentas	12,0	47,0	%

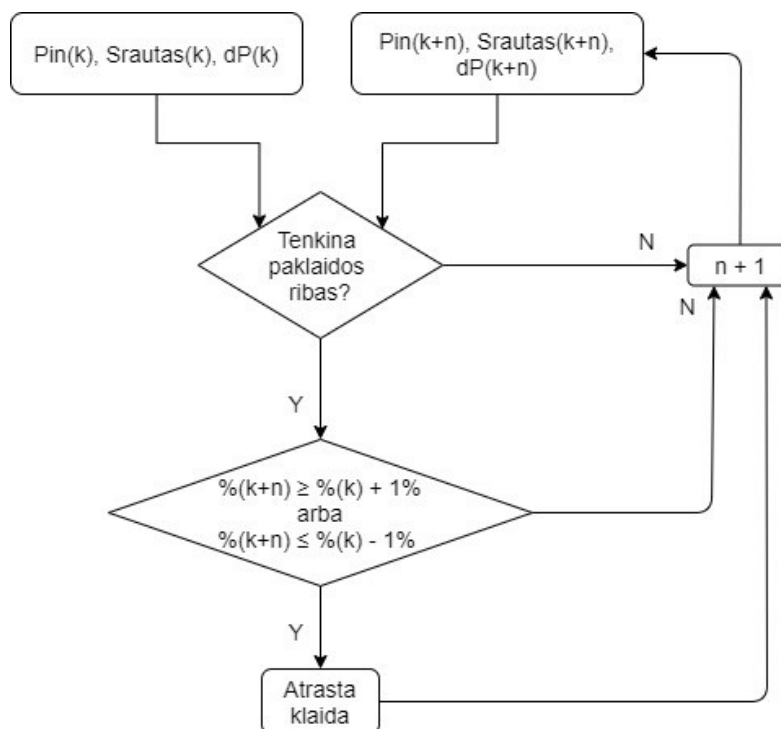
5.2. Aliarminių įvykių sudarymo principai naudojamiems algoritmams

Tipinėse dujų stotyse, reguliavimo sklendžių aliarminiai įvykiai formuojami skirtingais atvejais:

1. Nuostato ir grįžtamojo ryšio skirtumo didėjimo;
2. Nuostato ir grįžtamojo ryšio paklaidos pasiekus menamą nuostatą;
3. Vidinės sklendės klaidos.

Paminėti atvejai nenagrinėja atvejų reguliavimo sklendės veikimo darbo taškuose, kurie gali būti apibrėžiami bent 3 parametrais paminėtais 12 lentelėje. Analizuojant veikimą darbo taškuose ilguoju periodu, būtų galima pastebėti nukrypimus nuo darbo taško, atsirandančią santykinę paklaidą. Reguliavimo sklendžių remontas magistraliniame dujotiekyje yra brangus ir ilgas procesas, dėl reikalingo išmontavimo ir stoties sustabdymo remonto laikotarpiu, todėl iš anksto nuspėti apie prasidėjusį nusidėvėjimą yra naudinga, nes pirmiausia būtų galima patikrinti išorinius veiksnius ar užsakyti patikrą, taip sutrumpinant išėmimo iš eksploatacijos laikotarpį.

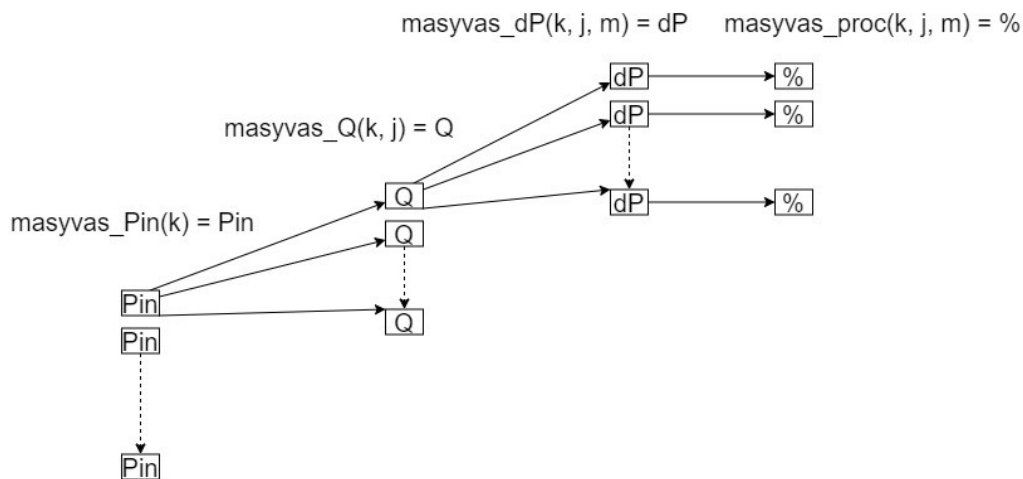
Analizuojant istorinius duomenis galima naudoti iteraciją visam duomenų kiekiui, kai vienos valandos parametrų reikšmės yra tikrinamos su visų kitų likusių valandų parametrų reikšmėmis siekiant atrasti panašius darbo taškus ir palyginti šiuose skirtinguose laiko momentuose ieškomas reikšmes.



15 pav. Paieškos principas istorinių duomenų analizei

Toks paieškos principas galimas tik turint istorinius duomenis ir realiame laike tokiu principu klaidų formavimas negalimas, nes kiekvieno įrašo saugojimas PLV atmintyje užimtų labai didelius atminties kiekius, kaip pavyzdys: norint sukaupti 2 metų duomenis kas 1 minutę 5 matuojamiems parametrams ir juos saugant slankaus kabelio tipo formatu, reikalingas 21,02 Mb atminties kiekis. Dujų stotyje naudojamame PLV originalus atminties kiekis siekia 8 Mb, o tai yra 2,6 karto mažiau negu reikia 2 metų istoriniams duomenims saugoti.

Siekiant fiksuoti aliarminius įvykius realiuoju laiku, paiešką galima vykdyti formuojant trimatį masyvą. Kaip 16 pav. pavaizduota, ieškant įėjimo slėgio, jam priskiriant esamą srautą, srautui slėgio perkrytį, o slėgio perkryčiui atsidarymo procentą. Gaunamas trimatis masyvas priimančiam kad prie tos pačios parametro reikšmės, visos sekančio parametro reikšmės yra galimos.



16 pav. Paieškos principas panašių darbo taškų radimui

Pagal matuojamus parametrus galima suformuoti kelis skirtingus paieškos principus skirtingiems paieškos parametrams fiksuoti.

13 lentelė. Paieškos principų formavimas

Paieškos principo kodas	Paieškos principas	Ieškoma	Santykinė paklaidos riba
Algoritmas_1	Iėjimo slėgis → Srautas → Slėgio perkrytis	Atsidarymo procentas viršija paklaidos ribas	> ±0,5 %
Algoritmas_2	Iėjimo slėgis → Išėjimo slėgis → Srautas	Atsidarymo procentas viršija paklaidos ribas	> ±0,5 %
Algoritmas_3	Atsidarymo procentas → Iėjimo slėgis → Išėjimo slėgis	Srautas viršija paklaidos ribas	> ±1200 m ³ /h
Algoritmas_4	Atsidarymo procentas → Iėjimo slėgis → Slėgio perkrytis	Srautas viršija paklaidos ribas	> ±1200 m ³ /h

Paieškos principu kintamųjų eiliškumas nėra svarbus, dėl anksčiau minėtos prielaidos, kad visos sekančio parametro reikšmės yra galimos, todėl galutinis rezultatas nesiskiria nuo paieškos eigos.

5.3. Duomenų masyvų analizė naudojami įrangai ir paieškos principų formavimui

Priklausomai nuo pasirinktų režimų, sudaryti masyvai ir jų dydžiai su skirtingomis paklaidomis, kurios apibrėžia naują darbo tašką. Masyvai sudaromi remiantis, kad pirmas masyvo elementas atitinka minimalią matuojamo parametro reikšmę, o paskutinis – maksimalią, išlaikant vienodą skirtumą tarp visų šalia esančių masyvo narių.

14 lentelė. Slėgių masyvų dydžiai

Masyvas	Paklaida			
	± 0,1 bar		± 0,2 bar	
	Pilno dydžio	Pagal (16) ir (17)	Pilno dydžio	Pagal (16) ir (17)
Iėjimo slėgio	76 nariai	55 nariai	51 narys	37 nariai
Išėjimo slėgio	76 nariai	65 nariai	51 narys	44 nariai
Slėgio perkryčio	116 narių		78 nariai	

Srauto paklaida pasirenkama vidutiniam 2 metų srautui pritaikius ± 3% paklaidą. Nustatytas vidutinis srautas siekia 40000 m³/h ir vidutinis atsidarymo procentas ~27%, o prie šių sąlygų minimaliu žingsniu atsidariusi reguliavimo sklendė apytiksliai 3-4% padidina arba sumažina srautą.

15 lentelė. Srauto masyvo dydis

	Paklaida
Masyvas	± 1200 m ³ /h
Srautas	36 nariai

16 lentelė. Atsidarymo procento masyvo dydis

	Paklaida
Masyvas	± 0,5 %
Atsidarymo procentas	35 nariai

Remiantis visų masyvų dydžiais ir suformuotais paieškos principais 13 lentelėje, galima apskaičiuoti kiek atminties užims didžiausias trijų matmenų masyvas ir ar neviršys programinės įrangos maksimalaus galimo sukurti masyvo dydžio. Antrajam paieškos principui, vadovaujantis (6) ir (7) formulėmis, galima sumažinti masyvų dydžius.

17 lentelė. Masyvų dydžiai priklausomai nuo paieškos principo

Paieškos principo kodas	Naudojama slėgio paklaida	Masyvo matmenys	Masyvo dydis naudojant 32 bitų slankaus kabelio tipo kintamuosius (baitais)	Santykis su maksimaliu galimu vieno masyvo dydžiu
Algoritmas_1	± 0,1 bar	76x36x116	1296504	19,37
	± 0,2 bar	51x36x78	572832	8,74
Algoritmas_2	± 0,1 bar	76x76x36	831744	12,69
	± 0,2 bar	51x51x36	374544	5,71
Algoritmas_2 sumažintas	± 0,1 bar	55x65x36	491904	7,51
	± 0,2 bar	37x44x36	224352	3,42
Algoritmas_3	± 0,1 bar	55x65x36	500500	7,63
	± 0,2 bar	37x44x36	227920	3,47
Algoritmas_4	± 0,1 bar	55x35x116	893200	13,63
	± 0,2 bar	37x35x116	600880	9,16

Kaip matyti 17 lentelėje, visų paieškos principų didžiausi trijų matmenų masyvai yra didesni negu maksimalus galimas sukurti vienas masyvas naudojamoje programinėje įrangoje. Šiai problemai išspręsti yra galimos 3 išeitys:

1. Naudoti kelis skirtingus masyvus apibrėžiančius tą patį elementą tik kitos eilės;
2. Saugoti duomenis atmintyje UINT tipo kintamaisiais;
3. Pritaikyti maišos funkciją (angl. hash function) aprašant kelis kintamuosius viename.

18 lentelė. Problemos sprendimo būdų analizė siekiant sukurti masyvus algoritmų naudojimui

Sprendimo numeris	Teigiami faktoriai	Neigiami faktoriai
1	Aprašomi visi galimi scenarijai išlaikant pradinį masyvo dydį	Didelis užimamos atminties kiekis
2	Aprašomi visi galimi scenarijai išlaikant pradinį masyvo dydį Sunaudojama dvigubai mažiau atminties	Gali nepakakti atminties sumažinimo Reikalauja papildomų skaičiavimų
3	Galima sunaudoti iki 12 kartų mažiau atminties	Reikalauja papildomų sudėtingų skaičiavimų

Kadangi iš esmės pirmo sprendimo teigiami faktoriai neatsveria neigiamų faktorių ir optimizavimo problema lieka neišspręsta, todėl toliau nagrinėjami tik antras ir trečias optimizavimo metodai siekiant maksimaliai efektyvių algoritmų pritaikymo naudojimui PLV. Antrojo ir trečiojo būdų masyvų dydžių įvertinimai pateikti 19 lentelėje.

19 lentelė. 2 ir 3 sprendimais gauti masyvų dydžiai

Paieškos principo kodas	Naudojama slėgio paklaida	Masyvo formavimas	Masyvo matmenys	Masyvo dydis (baitais)	Masyvo kintamųjų tipas	Santykis su maksimaliu galimu vieno masyvo dydžiu
Algoritmas_1	± 0,1 bar	Originalus	76x36x116	1296504	32 bitų slankaus kablelio	19,37
		2 sprendimas	76x36x116	634752	16 bitų	9,68
		3 sprendimas	38x18x58	158688	32 bitų slankaus kablelio	2,42
	± 0,2 bar	Originalus	51x36x78	572832	32 bitų slankaus kablelio	8,74
		2 sprendimas	51x36x78	286416	16 bitų	4,37
		3 sprendimas	26x18x39	73008	32 bitų slankaus kablelio	1,11
Algoritmas_2	± 0,1 bar	Originalus	76x76x36	831744	32 bitų slankaus kablelio	12,69
		2 sprendimas	76x76x36	415872	16 bitų	6,34
		3 sprendimas	38x38x18	103968	32 bitų slankaus kablelio	1,58
	± 0,2 bar	Originalus	51x51x36	374544	32 bitų slankaus kablelio	5,71
		2 sprendimas	51x51x36	187272	16 bitų	2,85
		3 sprendimas	26x26x18	48672	32 bitų slankaus kablelio	0,74
Algoritmas_2 sumažintas	± 0,1 bar	Originalus	55x65x36	491904	32 bitų slankaus kablelio	7,5
		2 sprendimas	55x65x36	245952	16 bitų	3,75
		3 sprendimas	28x32x18	64512	32 bitų slankaus kablelio	0,98
	± 0,2 bar	Originalus	37x44x36	224352	32 bitų slankaus kablelio	3,42
		2 sprendimas	37x44x36	112176	16 bitų	1,711
		3 sprendimas	19x22x18	30096	32 bitų slankaus kablelio	0,46
Algoritmas_3	± 0,1 bar	Originalus	55x65x36	500500	32 bitų slankaus kablelio	7,63
		2 sprendimas	55x65x36	250250	16 bitų	3,82
		3 sprendimas	27x32x18	62208	32 bitų slankaus kablelio	0,95
	± 0,2 bar	Originalus	37x44x36	227920	32 bitų slankaus kablelio	3,47
		2 sprendimas	37x44x36	113960	16 bitų	1,74
		3 sprendimas	19x22x18	30096	32 bitų slankaus kablelio	0,46
Algoritmas_4	± 0,1 bar	Originalus	55x35x116	893200	32 bitų slankaus kablelio	13,63
		2 sprendimas	55x35x116	446600	16 bitų	6,81

		3 sprendimas	28x33x58	214368	32 bitų slankaus kablelio	3,27
	± 0,2 bar	Originalus	37x35x116	600880	32 bitų slankaus kablelio	9,16
		2 sprendimas	37x35x116	300440	16 bitų	4,58
		3 sprendimas	19x18x58	79334	32 bitų slankaus kablelio	1,21

Paryškintai pažymėti santykiai mažesni už vienetą rodantys, kad masyvo dydis yra mažesnis už maksimalų galimą sukurti masyvą naudojamoje programinėje įrangoje. Norint ieškoti panašių darbo taškų PLV, patogiausia būtų naudoti paieškos principus ir slėgių paklaidas su kuriomis didžiausias reikalingo masyvo santykis yra mažesnis už vienetą lyginant su maksimaliu galimu sukurti. Naudojantis 19 lentelės rezultatais matyti, kad saugant duomenis UINT tipo kintamaisiais, visais atvejais sunaudojamos atminties kiekis viršija didžiausio galimo sukurti masyvo dydį. Norint panaudoti šį būdą reiktų mažinti matuojamų parametrų ribas arba didinti paklaidas dėl ko gali pablogėti darbo taškų nustatymas. Dėl šios priežasties antrojo būdo panaudojimo galimybė taip pat atkrenta. Paieškos principas „Algoritmas_4“ visais atvejais reikalauja per didelio resurso sukuriant kintamųjų masyvus nustatytam dydžiui.

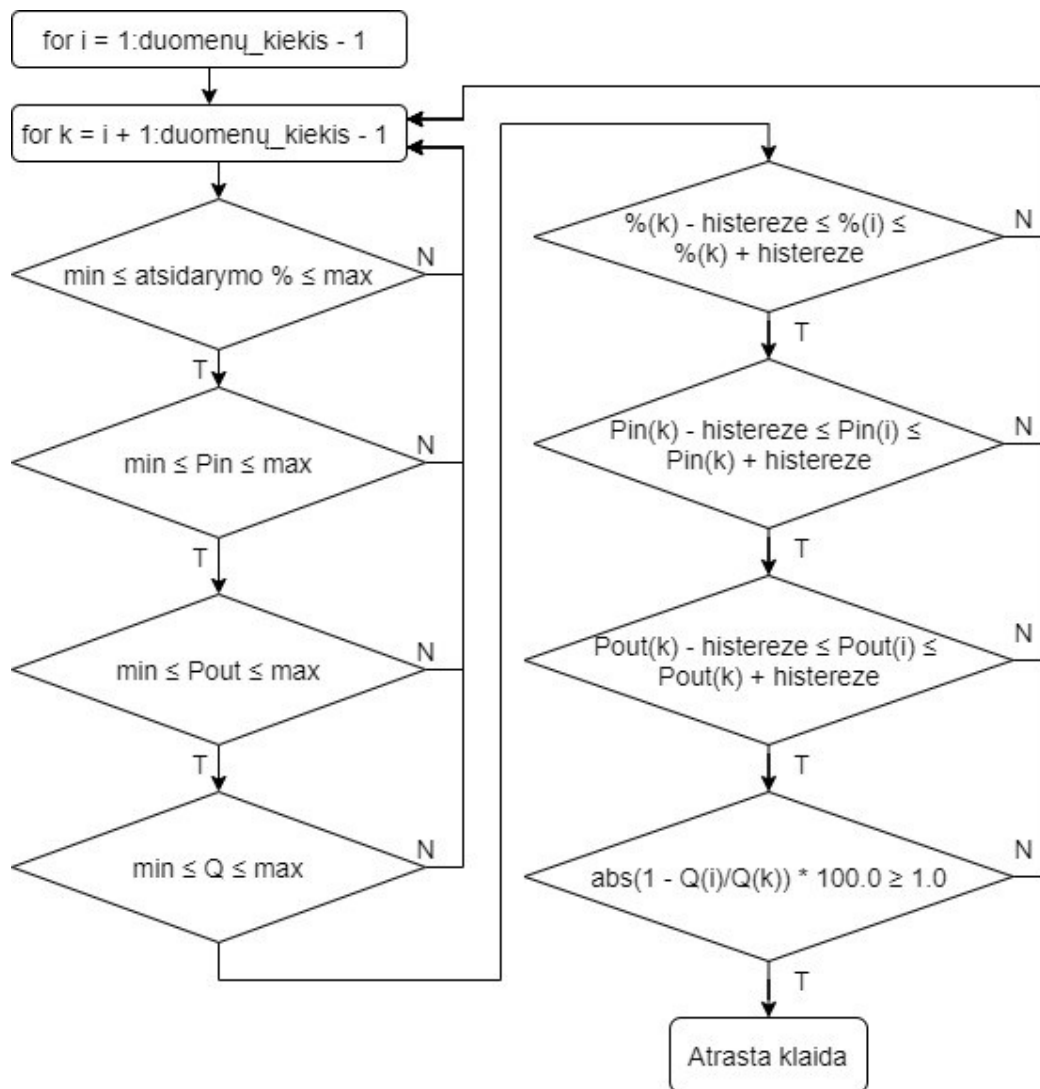
Pagal atliktą užimamos atminties analizę pasirinktiems atvejams matyti, kad norint sukurti praktikoje naudojamą algoritmą reguliavimo sklendės darbo sutrikimui nustatyti, reiktų naudoti paieškos principus „Algoritmas_2 sumažintas“ ir „Algoritmas_3“ pritaikant 3 optimizavimo būdą. Tik naudojant šiuos paieškos principus ir optimizavimo būdą, su slėgio paklaidomis ±0,1 baro ir ±0,2 baro maksimalus gautas vienas masyvas neviršija maksimalaus galimo sukurti naudojamoje programinėje įrangoje.

6. Sukurti algoritmai aliarminių įvykių formavimui

Remiantis 4 skyriuje sudarytais kritinių įvykių sudarymo principais, paieškos galimybėmis, sukurti 5 algoritmai dujų stoties reguliavimo sklendės pažengusių aliarminių formavimui. Algoritmai remiasi 4.1.3 skyrelyje nurodytais panašių atvejų paieškos režiais.

6.1. Istorinių duomenų analizės algoritmas

Pirmasis algoritmas skirtas istoriniams duomenims analizuoti naudojant MATLAB programinę įrangą. Algoritmas sudarytas ieškant panašių istorinių darbo taškų, kada trys parametrai sudaro vieną darbo tašką: srautas, slėgio perkrytis ir įėjimo slėgis yra panašūs kitame laiko momente. Šiuo atveju atliekama iteracija tarp žinomo duomenų kiekio lyginant laiko momentus nuo anksčiausio iki vėliausio (16 pav.).



17 pav. Naudojamas algoritmas istoriniams duomenims analizuoti

Pradžioje tikrinama ar *i-tuoju* ir *k-tuoju* momentais atsidarymo procentas, įėjimo slėgis, išėjimo slėgis ir srautas tenkina numatytuosius duomenų minimalius ir maksimalius režius. Sekančiu žingsniu tikrinama ar *k-tuoju* momentu esanti atsidarymo procento, įėjimo ir išėjimo slėgių reikšmė tenkina *i-*

tuoju momentu esančias analogiškas reikšmes su norima histereze. Tenkinant šią sąlygą paskutiniu žingsniu tikrinama ar *i-tuoju* ir *k-tuoju* momentais esama srautų santykinė riba išreikšta procentais, tenkiną sąlygą. Teigiamu atveju yra fiksuojama atrasta klaida ir esamos momentinės reikšmės abejais laiko momentais. Neigiamu atveju klaida nėra fiksuojama ir vykdoma kita iteracija siekiant atrasti panašų darbo tašką.

Naudojant tokį algoritmą galima išanalizuoti turimus istorinius duomenis skirtinguose darbo taškuose ir patikrinti ar yra santykinė srauto paklaida panašiuose darbo taškuose. Norint turėti tikslią ir kokybišką duomenų analizę, reikia atlikti rankinę duomenų patikrą siekiant išvengti pereinamojo proceso duomenų. Priklausomai nuo duomenų periodiškumo tai galima realizuoti automatiškai lyginant ar *i-tuoju* momentu tikrinamas parametras tenkina paklaidos ribą lyginant su $i + 1$ ir $i - 1$ momentais, analogiškai *k-tuoju* ir $k + 1$ bei $k - 1$ momentais.

6.2. Algoritmas tausojantis PLV atmintį

Antrasis algoritmas skirtas duomenų analizei realiuoju laiku naudojant PLV. Iš 19 lentelės duomenų matyti, kad skiriantis naudojamam paieškos principui kartu skiriasi ir naudojamų masyvų dydžiai. Sukurtas algoritmas remiasi 16 pav. pavaizduota schema, kai matuojami parametrai pagal jų vertę priskiriami atitinkamiems masyvų elementams, taip sudarant medžio struktūrą skirtingiems darbo taškams fiksuoti.

Pagal 19 lentelę, geriausiai PLV atmintis taupoma jeigu naudojamas 3 duomenų optimizavimo būdas (angl. hashing). Siekiant algoritme naudoti skaičius su kableliu tiksliam skaičiavimui ir darbo taškų suradimui, priimtas naudoti optimizavimo būdas išsaugant 2 skaičius viename.

20 lentelė. Skaičiaus masyve sudarymo algoritmas

	Vidurinio + 1 masyvo elemento reikšmė				Pirmo masyvo elemento reikšmė			
Skaičius	7	6	5	4	3	2	1	0

Visi masyvai kuriami 32 bitų slankaus kablelio tipo, kad viename naryje galėtų būti saugojamas didelis skaičius. Kiekvieną masyvo narį sudaro 9 skaitmenų skaičius, kuriame talpinami 2 skirtingų darbo taškų rodmenys. Kaip pavyzdys: turimas originalus 76 narių masyvas, kurio kitimo režiai yra nuo 31,0 iki 46,0 kas 0,2. Pirmojo masyvo nario vertė lygi 31,0, antrojo 31,2, trečiojo 31,4 ir t.t. iki 46,0. Siekiant sumažinti atmintį, masyvas gali būti perskeliamas pusiau ir paliekami tik 38 nariai. Tokiu atveju pirmasis masyvo narys išlieka lygus 31,0, antrasis 31,2 ir t.t. iki 38,4. Likusios vertės nuo 38,6 iki 46,0 pradedamos pildyti į tuos pačius masyvų narius, tik šįkart naudojamas daugiklis siekiant paslinkti vertes iki 4 skaičiaus prieš kablelį. Priklausomai nuo naudojamo tikslumo galima saugoti 1 arba 2 skaičius po kablelio skaičiams iki 100, kai tuo tarpu srauto vertės turi būti sumažinamos jas padalijant iš 100, kad būtų saugojamos tik 4 pirmutinės skaičiaus vertės. Paslinkus pavyzdinio masyvo reikšmes per 4 skaičius, naująjį 38 narių masyvą galima užpildyti sekančiomis vertėmis: 386003100, 400003120, 402003140 ir t.t. iki 460003840.

Kiekvieno masyvo nario užkodavimą ir atkodavimą galima parašyti algoritmu, tačiau jie gali skirtis dėl naudojamo tikslumo ar minimalių/maksimalių reikšmių didelio skirtumo.

```

pradinis_sk := min_sk;
for i := 1 to kiekis do
    pirmas_sk := real_to_dint((min_sk + (histereze * (i-1)) + kiekis*histereze)*100.0) * 10000;
    antras_sk := real_to_dint(pradinis_sk * 100.0);
    sk_masyvas[i] := dint_to_real(pirmas_sk + antras_sk);
    pradinis_sk := pradinis_sk + histereze;
end_for;

```

18 pav. Reikšmių užkodavimas į masyvą

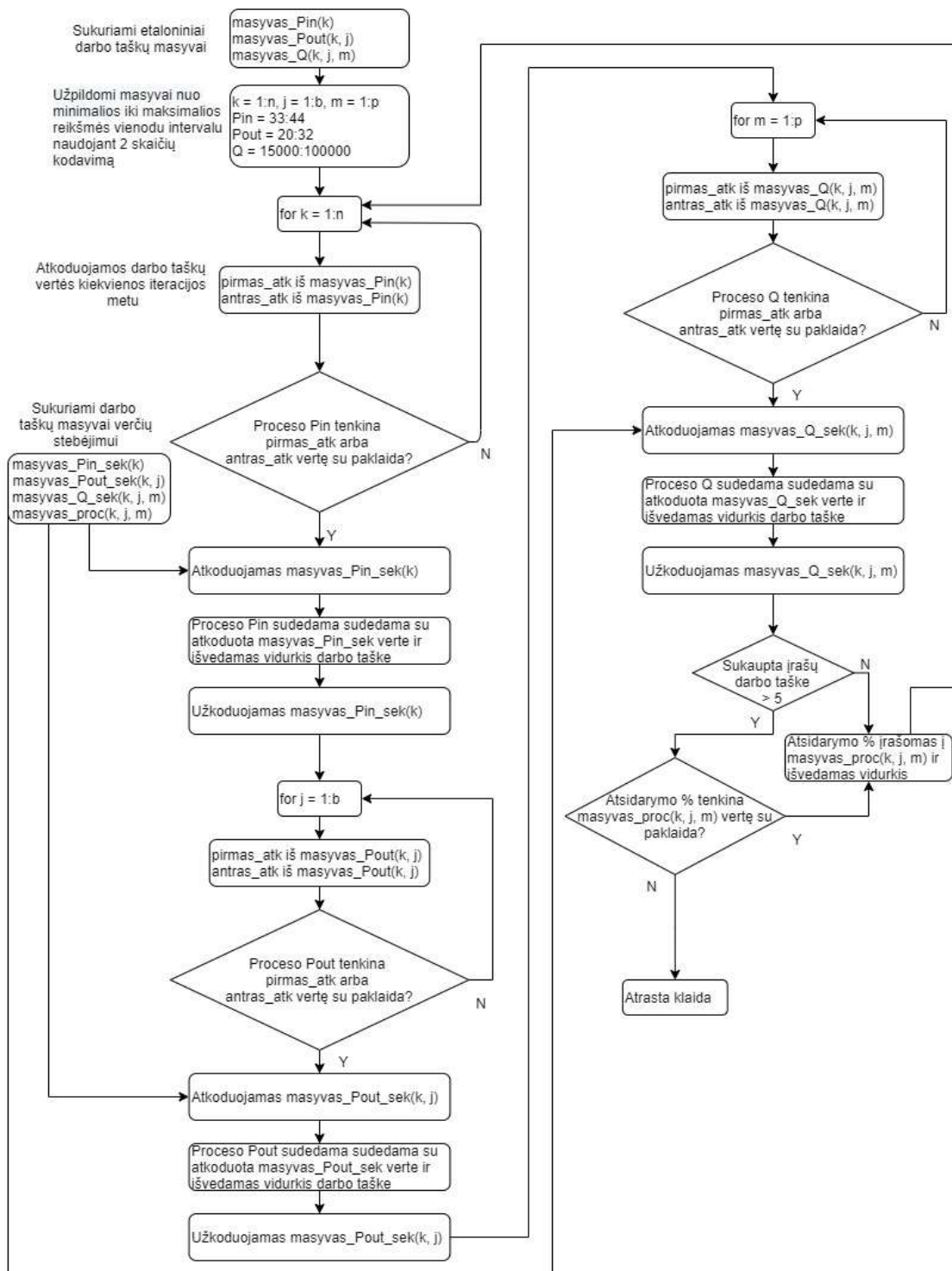
```

for i := 1 to kiekis do
    pirmas_atk := dint_to_real(real_to_dint(sk_masyvas[i] / 10000.0)) / 100.0;
    antras_atk := dint_to_real(real_to_dint(((sk_masyvas[i] / 10000.0) - dint_to_real(real_to_dint(sk_masyvas[i] / 10000.0))*1000.0))/10.0;
end_for;

```

19 pav. Reikšmių atkodavimas iš masyvo

Priklausomai nuo esamų darbo taško sąlygų, atkoduotos reikšmės palyginamos su darbo taško verte, išvedamas jų vidurkis ir vėl užkoduojama iki kito tikrinimo. Šio algoritmo vykdymo seka pavaizduota 20 pav.



20 pav. Algoritmas naudojant kodavimą

Jo naudojimas reikalauja didelio matematinų operacijų kiekio, nes naudojami trys iteraciniai ciklai visoms galimybėms patikrinti ir kiekvieno ciklo metu yra atkoduojamos ir užkoduojamos masyvų reikšmės.

Siekiant išvengti pereinamojo proceso, matuojamų parametrų reikšmėms fiksuoti pasitelkiamos papildomos pažengusių aliarminių įvykių formavimo sąlygos. Prieš algoritmui vykdant įvykių fiksavimą, dujų stotis ir jos parametrai turi atitikti šias sąlygas:

1. Stotis turi veikti nusistovėjusio darbo režimu.
2. Duomenys turi būti fiksuojami pasitelkiant filtravimą.

Pirmajai sąlygai tenkinti aprašytos sąlygos kurios fiksuoja pereinamojo proceso pradžią ir pabaigą taip sukuriant normalaus darbo režimo būseną dujų stočiai:

1. Srauto didinimo atveju pasiektas nuostatas ir išlaikomas darbo taškas ne trumpiau negu 5 minutes.
2. Srauto mažinimo atveju pasiektas nuostatas ir išlaikomas darbo taškas ne trumpiau negu 5 minutes.
3. Atsidariusi tik viena reguliavimo sklendė.
4. Visi proceso stabdymo sąlygos yra neaktyvios.
5. Matavimo linijos neatidarinėjamos ir neuždarinėjamos. Po įvykusio atidarymo arba uždarymo turi praeiti ne mažiau negu 5 minutės.
6. Atidaryta reguliavimo yra valdoma ne rankiniu režimu.

Antrajai sąlygai tenkinti galima pritaikyti 1.2 poskyryje paminėtą duomenų filtravimą imant apsibrėžtą vidurkio imtį. Kadangi naudojamosi Schneider Electric Unity Pro XLS programine įranga, vietoje nagrinėto filtravimo naudojamas vėlinimo filtras „LAG_FILTER“. Jo panaudojimu gaunamas panašus efektas, kai momentinės išaugusios ir staiga pranykusios reikšmės po vėlinimo išfiltruojamos.

$$G(s) = GAIN * \frac{1}{1+s*LAG} \quad (8)$$

$$OUT = OUT_{old} * \frac{dt}{LAG+dt} * \left(GAIN * \frac{IN_{old}+IN_{new}}{2} - OUT_{old} \right) \quad (9)$$

Naudojantis 8 ir 9 formulėmis galima apskaičiuoti kokią įtaką turi pasirinktas reikšmės vėlinimas ir stiprinimas. Šiuo atveju stiprinimas pasirinktas lygus 1, o vėlinimas 100ms. Algoritmo paleidimo ir derinimo darbams sukurta parametrų derinimo lentelė. 21 lentelės parametrų minimalios ribos tenkina 19 lentelės maksimalius galimus masyvų dydžius pasirinktiems paieškos principams.

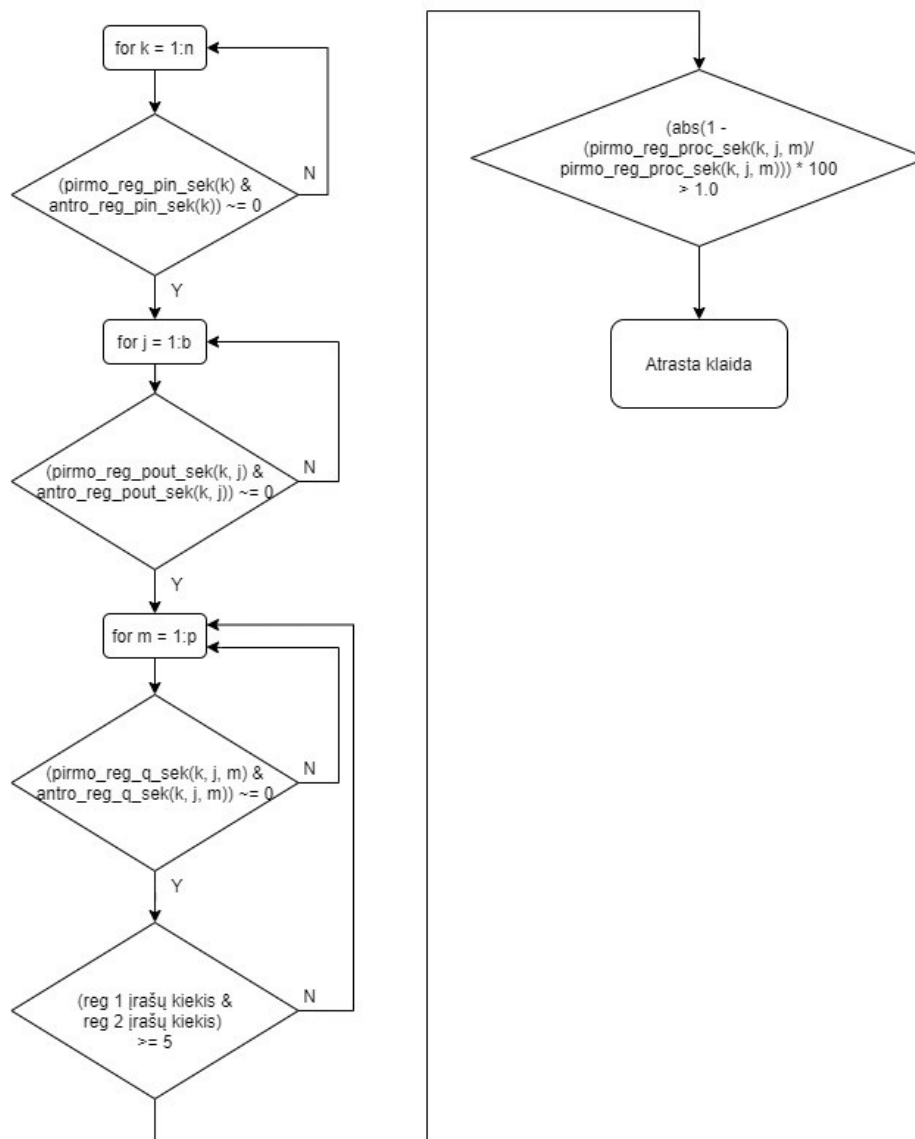
21 lentelė. Parametrų pasirinkimo lentelė paleidimo ir derinimo metu.

Parametras	Minimali riba	Maksimali riba	Matavimo vienetai
Slėgio paklaida	±0,1	±0,2	bar
Srauto paklaida	±1200	±2000	m ³ /h
Vėlinimo stiprinimas	0,5	2	-
Vėlinimo laikas	0	2	s
Sukauptų įrašų kiekis vidurkiui	1	-	-
Santykinė paklaida aliarmo generavimui	1	-	%
Įėjimo slėgio režiai	33	44	bar
Išėjimo slėgio režiai	20	32	bar
Srauto režiai	15000	100000	m ³ /h

6.3. Algoritmas tikrinantis ieškomus parametrus panašiuose darbo taškuose skirtingų reguliavimo sklendžių duomenyse

Kadangi tiriamą technologinį procesą sudaro dvi reguliavimo sklendės negalinčios dirbti vienu metu esant normaliam darbo režimui, sukurtas algoritmas reguliavimo sklendžių tarpusavio tikrinimui tuose pačiuose darbo taškuose. Kaip minėta 4.1.3 skyrelyje, duomenų režiai parinkti, kad tenkintų abiejų reguliavimo sklendžių istorinius darbinus režius, todėl galima naudoti vienodus masyvų dydžius ir jų ribas.

Technologiškai, prie tokių pačių sąlygų, t.y. to paties slėgio, srauto, išėjimo slėgio, reguliavimo sklendėms apsikeitus darbo režimais, procentinė atsidarymo išraiška prieš tai buvusio atidaryto regulatoriaus ir dabar esančio turi būti tokia pati, nes dirbama tame pačiame darbo taške. Siekiant atrasti galimą reguliavimo sklendžių išsidėvėjimą, reikia patikrinti atsidarymo procento vertes tuose pačiuose darbo taškuose.



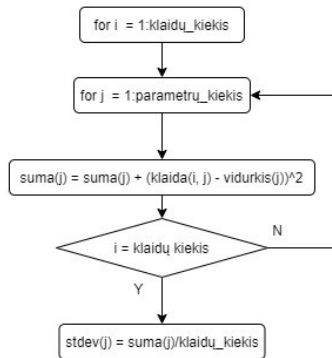
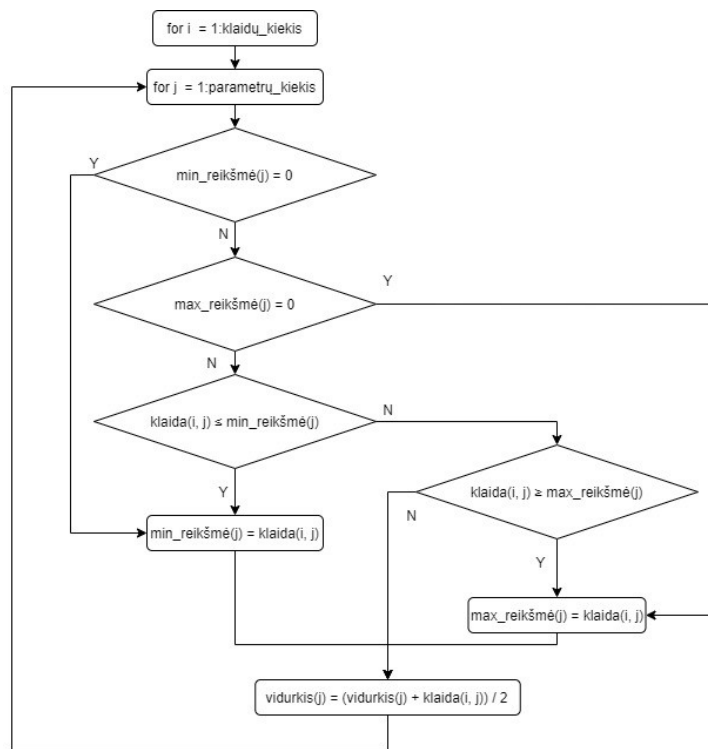
21 pav. 2 reguliavimo sklendžių panašių darbo taškų palyginimas

Šio algoritmo realizacija galima tik sukaupus numatytą minimalų įrašų kiekį tame pačiame darbo taške abiem reguliavimo sklendėms. Tiriamuoju atveju pasirinkti 5 įrašai, nes turimi duomenys yra fiksuoti kas valandą. Iš turimų trimačių masyvų tikrinama ar konkrečiame darbo taške yra įrašų pirmos ir antros reguliavimo sklendės masyve. Pagal paieškos principą, jeigu visuose trijuose parametruose yra užfiksuotos reikšmės ir įrašų kiekis yra nemažesnis negu 5, tuomet galima tikrinti atsidarymo procento vidurkius. Kai esant toms pačioms darbo sąlygoms (priklausomai nuo pasirinkto paieškos principo) ieškomų parametru vidurkiai darbo taške viršija numatytą santykinę paklaidą, yra formuojamas aliarmas pranešantis apie reguliavimo sklendžių darbo taškų neatitikimą prie tų pačių sąlygų.

6.4. Algoritmas aliarminių įvykių detaliai analizei remiantis matuojamų duomenų vidurkiais ir nuokrypiais

Siekiant proceso technologui ir operatoriui pateikti detalesnę analizę apie pasikartojančius aliarmus darbo taškuose, patikrinamos fiksuojamų parametru minimalios, maksimalios reikšmės bei vidurkiai. Tai naudinga norint nustatyti ar atsirandantys neatitikimai atsiranda tik prie tam tikrų sąlygų ar kinta visame diapazone.

Atsiradus naujam užfiksuotų klaidų kiekiui, nauja reikšmė patikrinama ir priskiriama naujai minimaliai arba maksimaliai reikšmei. Jeigu netenkinamos abi sąlygos, reikšmė paprasčiausiai pridedama prie jau esamo klaidų vidurkio ir išvedamas naujas vidurkis. Apskaičiavus naują vidurkį išvedamas naujas matuojamo parametro standartinis nuokrypis. Minimalios ir maksimalios reikšmės reikalingos norint pastebėti kokiam režyme atsiranda darbo sutrikimai, o vidurkis ir standartinio nuokrypio rodymas nurodo ar darbo sutrikimai atsiranda tik ties vienu darbo tašku, ar yra gaunami platesniame darbo taškų diapazone.



22 pav. Detalios klaidų analizės algoritmas

7. Tyrimų rezultatai

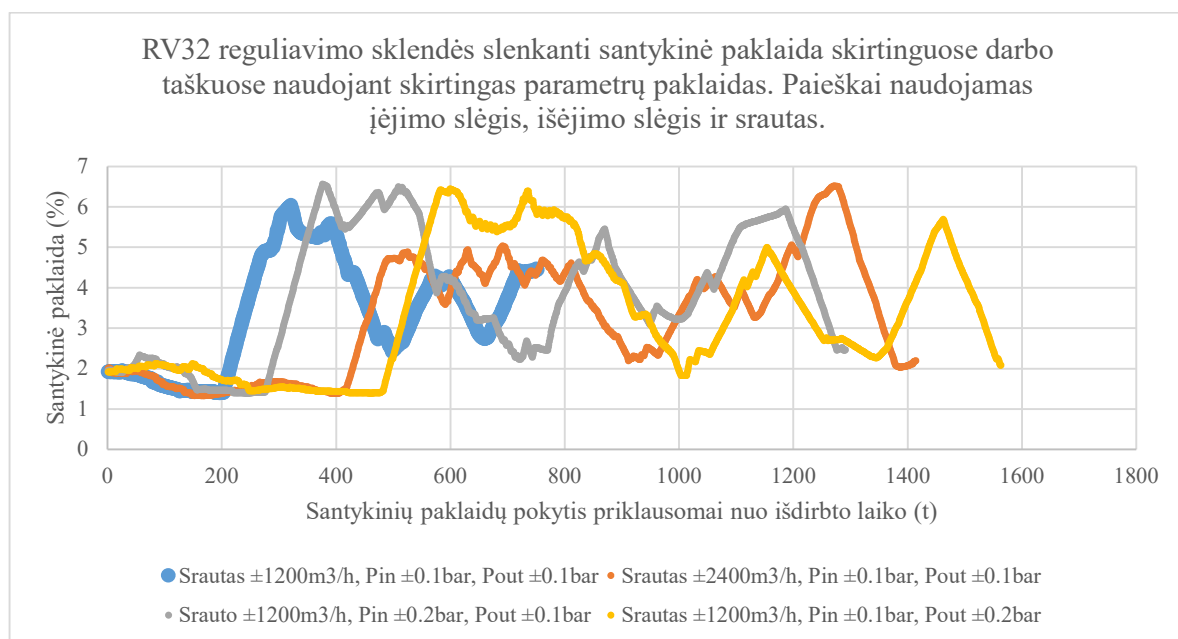
Dujų stoties duomenų analizės algoritmai išbandyti naudojantis istoriniais duomenimis ir testavimo aplinkoje su technine įranga. Pateikti atskirų algoritmų ir jų tarpusavio rezultatų analizė siekiant patikrintų jų validumą bei praktinį panaudojimą.

7.1. Istorinių duomenų analizės algoritmo aliarninių įvykių formavimo rezultatai naudojant skirtingas paklaidas

5.1 poskyryje pateiktu algoritmu bei jo paieškos principu, sukurtas jo praktinis panaudojimas analizuojant istorinius duomenis. Rezultatams gauti naudotasi MATLAB programine įranga. Naudojantis 15 lentelėje nurodytas parametrų režiais, suformuotos sąlygos kada ieškoma galimų darbo taško nukrypimų.

7.1.1. Istorinių duomenų analizė ieškant panašaus įėjimo slėgio, išėjimo slėgio ir srauto

Pirmuoju atveju istoriniuose įrašuose ieškota panašaus įėjimo slėgio, išėjimo slėgio bei srauto. Naudotasi 12 lentelėje nurodytais sumažintais įėjimo ir išėjimo slėgių paieškos režiais atsižvelgiant į apskaičiuojamą minimalią ir maksimalią slėgio perkryčio ribą.



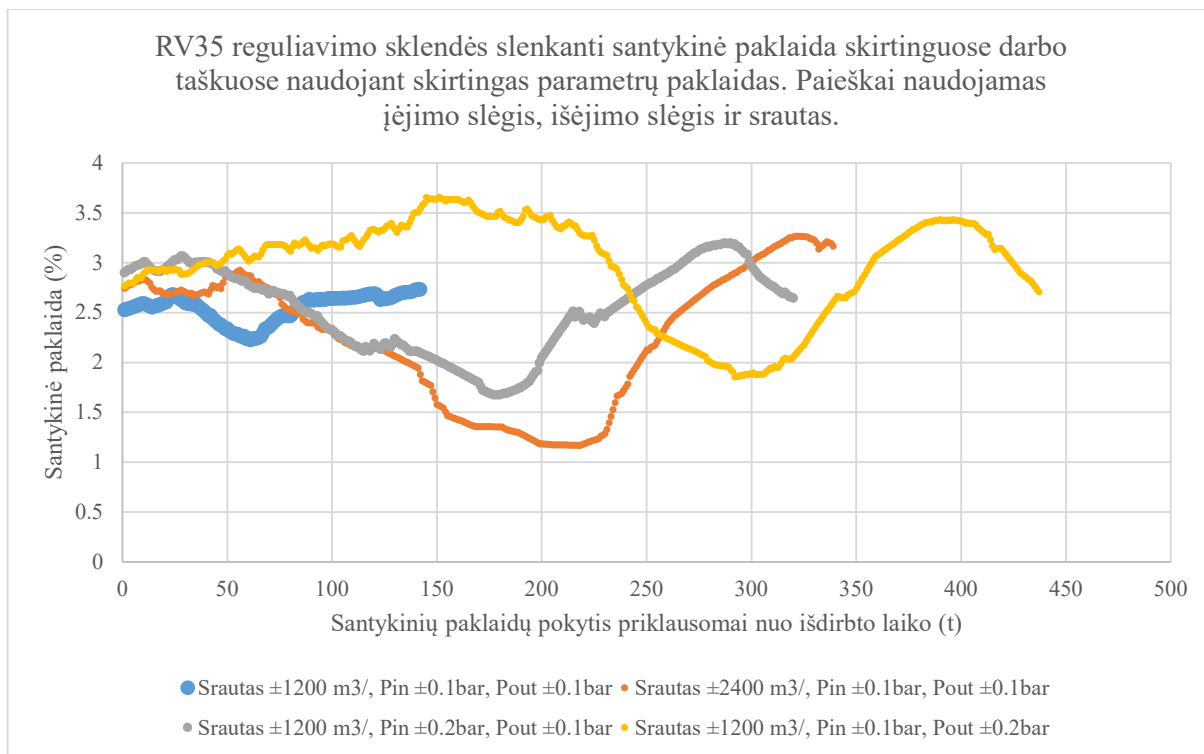
23 pav. RV32 reguliavimo sklendės atrastų santykinų paklaidų kreivė nepriklausomai nuo darbo taško. Palyginimas su skirtingomis paklaidomis ir jų įtaka surastų atvejų kiekiui, ieškant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

22 lentelė. Atrastų atvejų skaičius RV32 reguliavimo sklendei su skirtingomis paklaidomis

Srauto paklaida	Įėjimo slėgio paklaida	Išėjimo slėgio paklaida	Atrastų atvejų kiekis
±1200,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,1 bar	852
±2400,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,1 bar	1514
±1200,0 m ³ /h	± 0,2 bar	± 0,1 bar	1391
±1200,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,2 bar	1663

Ieškant panašių darbo taškų šiuo principu pastebėtas santykinės paklaidos augimas nepriklausomai nuo tirtu darbo taško. Santykinų paklaidų slenkančio vidurkio grafike matyti, kad iki 200 iširtų matavimų santykinė paklaida varijavo tarp 1,5 – 2 %, o nuo 600 iki 800 matavimų režyje išaugo iki 2,7 – 4,5 % (naudojant mažiausias parametru paklaidas).

RV35 reguliavimo sklendei atrastų atvejų skaičiaus prieaugio ar sumažėjimo neina pasakyti, nes naudojant mažiausias paklaidas, santykinė paklaida išlieka 2,2 – 2,7 % režyje.



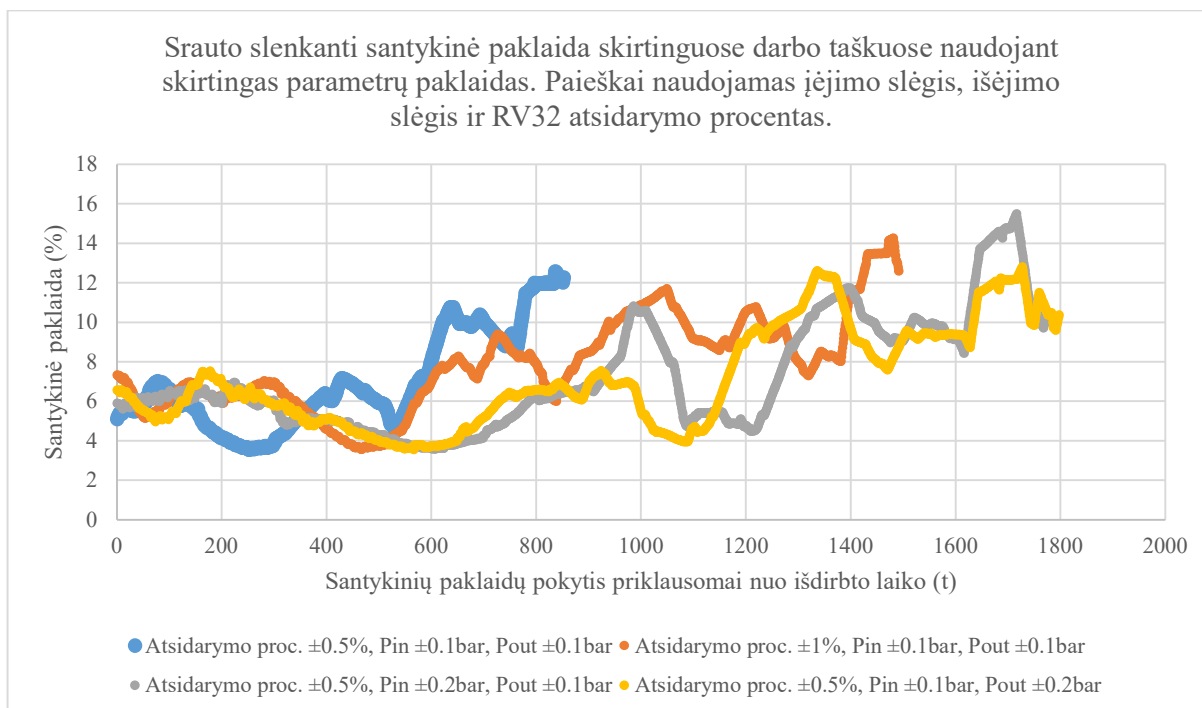
24 pav. RV35 reguliavimo sklendės atrastų santykinų paklaidų kreivė nepriklausomai nuo darbo taško. Palyginimas su skirtingomis paklaidomis ir jų įtaka surastų atvejų kiekiui, ieškant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

23 lentelė. Atrastų atvejų skaičius RV35 reguliavimo sklendei su skirtingomis paklaidomis

Srauto paklaida	Įėjimo slėgio paklaida	Išėjimo slėgio paklaida	Atrastų atvejų kiekis
±1200,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,1 bar	242
±2400,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,1 bar	439
±1200,0 m ³ /h	± 0,2 bar	± 0,1 bar	420
±1200,0 m ³ /h	± 0,1 bar	± 0,2 bar	537

7.1.2. Istorinių duomenų analizė ieškant panašaus atsidarymo procento, įėjimo slėgio ir išėjimo slėgio

Antruoju atveju ieškota naudojantis 3 paieškos principu, kai ieškoma pagal panašų atsidarymo procentą, įėjimo slėgį ir išėjimo slėgį. Naudojantis šiais parametrais fiksuojamas srautas darbo taške ir ieškoma jo santykinės paklaidos lyginant su istoriniu įrašu.



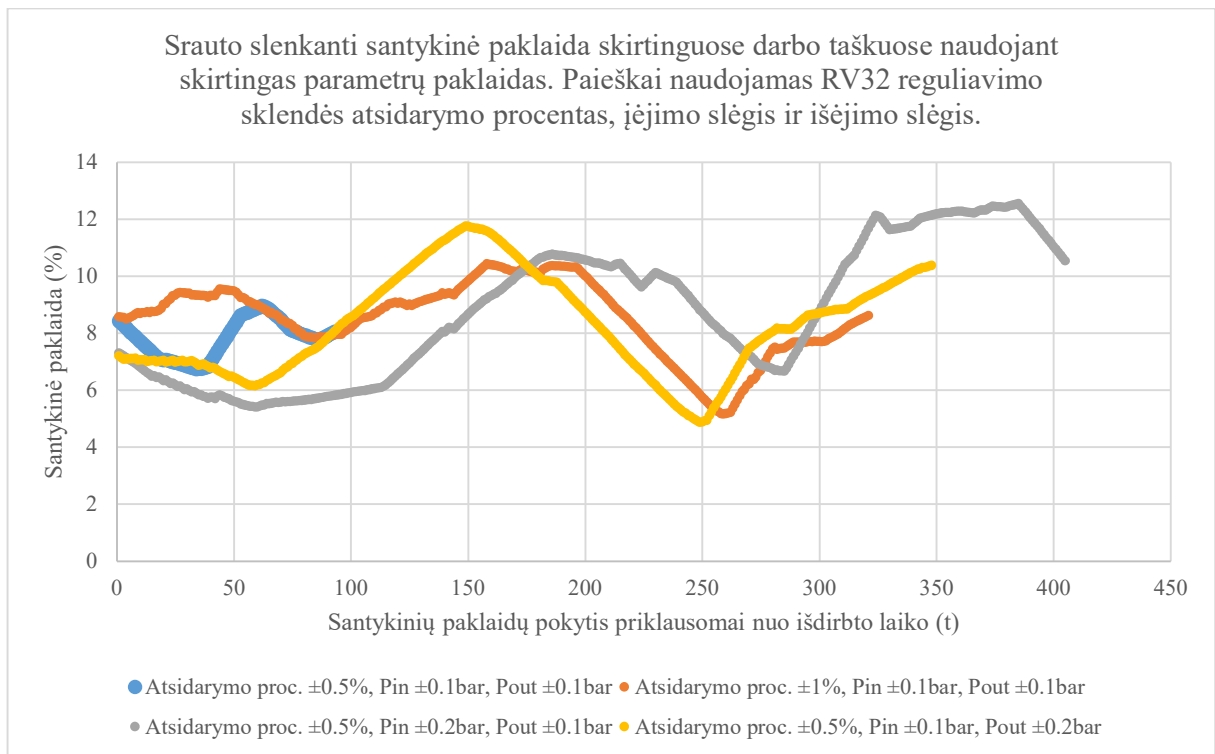
25 pav. RV32 reguliavimo sklendei atrastų srauto santykinųjų paklaidų kreivė nepriklausomai nuo darbo taško. Palyginimas su skirtingomis paklaidomis ir jų įtaka surastų atvejų kiekiui, ieškant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

24 lentelė. Atrastų atvejų skaičius RV32 reguliavimo sklendei su skirtingomis paklaidomis

Įėjimo slėgio paklaida	Atsidarymo procento paklaida	Išėjimo slėgio paklaida	Atrastų atvejų kiekis
$\pm 0,1 \text{ bar}$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,1 \text{ bar}$	953
$\pm 0,1 \text{ bar}$	$\pm 1 \%$	$\pm 0,1 \text{ bar}$	1592
$\pm 0,2 \text{ bar}$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,1 \text{ bar}$	1871
$\pm 0,1 \text{ bar}$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,2 \text{ bar}$	1898

Tiriant sistemą šiuo paieškos principu, RV32 reguliavimo sklendei pastebėtas ryškesnis srauto santykinės paklaidos didėjimas. Užfiksuotų atvejų pradžioje santykinė paklaida siekė $\sim 6\%$ imant pirmų 200 matavimų vidurkį, o tarp 600 – 800 matavimų paklaida pakilo iki $\sim 10\%$. Kadangi grafikas vaizduoja skirtinguose darbo taškuose užfiksuotus santykinųjų paklaidų vidurkius, būtų galima teigti, kad reguliatorius didėjant išdirbtam laiko kiekiui didina praleidžiamo srauto santykinę paklaidą.

RV35 reguliavimo sklendei naudojant šį paieškos principą gauta panaši srauto santykinės paklaidos kitimo kreivė kaip ir atsidarymo procento santykinė kreivė 24 pav.



26 pav. RV35 reguliavimo sklendei atrastų srauto santykinių paklaidų kreivė nepriklausomai nuo darbo taško. Palyginimas su skirtingomis paklaidomis ir jų įtaka surastų atvejų kiekiui, ieškant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

25 lentelė. Atrastų atvejų skaičius RV35 reguliavimo sklendei su skirtingomis paklaidomis

Įėjimo slėgio paklaida	Atsidarymo procento paklaida	Išėjimo slėgio paklaida	Atrastų atvejų kiekis
$\pm 0,1\text{ bar}$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,1\text{ bar}$	193
$\pm 0,1\text{ bar}$	$\pm 1\%$	$\pm 0,1\text{ bar}$	421
$\pm 0,2\text{ bar}$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,1\text{ bar}$	505
$\pm 0,1\text{ bar}$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,2\text{ bar}$	448

Šiai reguliavimo sklendei sunku pasakyti ar santykinė paklaida didėja ar mažėja.

7.1.3. Naudotų paieškos principų tarpusavio palyginimas

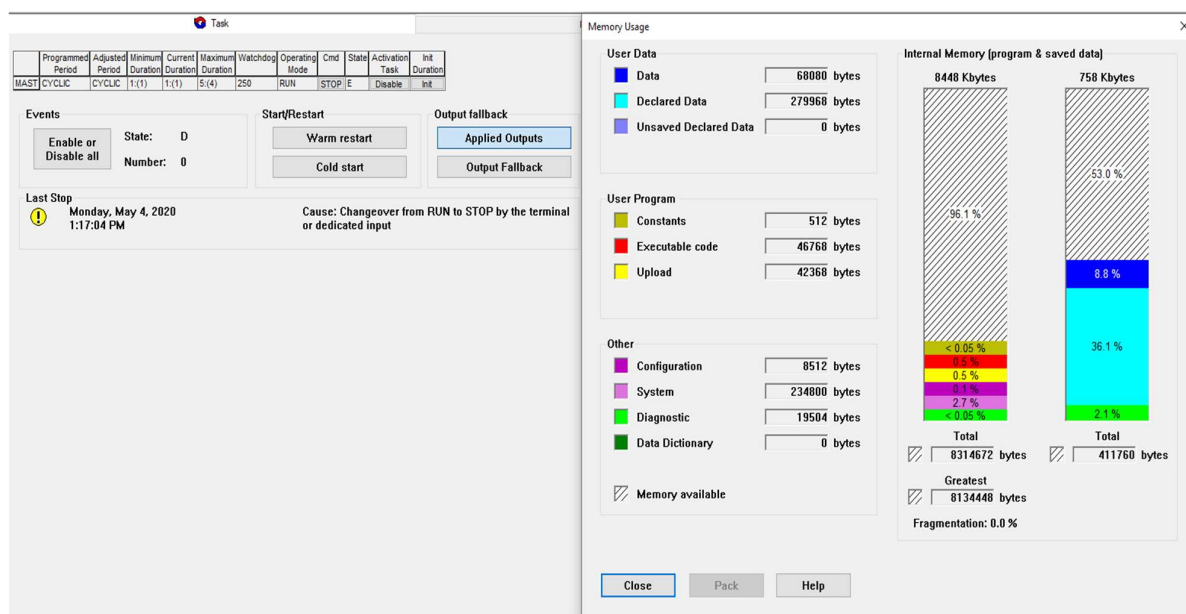
Naudoti paieškos principai vertino skirtingas santykinės paklaidas: pirmuoju atveju vertinta atsidarymo procento santykinė paklaida, o antruoju – srauto santykinė paklaida. Lyginant surastų atvejų skaičių, abejais paieškos principais atrastų atvejų kiekis praktiškai sutampa, tik skiriasi paklaidų vidurkių kreivės.

Vertinant šiuos istorinius duomenis galima teigti, kad RV32 reguliavimo sklendės santykinės paklaidos abejais atvejais auga priklausomai nuo išdirbto laiko, o RV35 reguliavimo sklendei reikalingas ilgesnis darbo laikas norint įvertinti kaip keičiasi santykinės paklaidos ilguoju laikotarpiu.

7.2. Tausojančio PLV atmintį algoritmo rezultatai

Darbai su PLV sukurta atskira testavimo aplinka Schneider Electric Unity Pro XLS programinėje įrangoje. Sukurtų algoritmų veikimo patikrinimui, matuojamiems parametrams generuoti pasirinktas „FGEN“ funkcinis blokas gebant generuoti atsitiktinius skaičius iš pasirinkto duomenų režio. Naudojantis 4 „FGEN“ funkciniais blokais sugeneruotas srautas, įėjimo slėgis, išėjimo slėgis ir atsідarymo procentas. Slėgio perkrytis išskaičiuotas iš tuo metu esančių įėjimo ir išėjimo slėgių. Sugeneruotų atsitiktinių skaičių ribos pasirinktos iš 12 lentelės. Pasirinktam paieškos principui PLV paliktas dirbti 7 dienas siekiant pastebėti ar neišaugs valdiklio maksimalus ciklo laikas, ar neatsiranda papildomų klaidų dėl didelio matematinių operacijų skaičiaus.

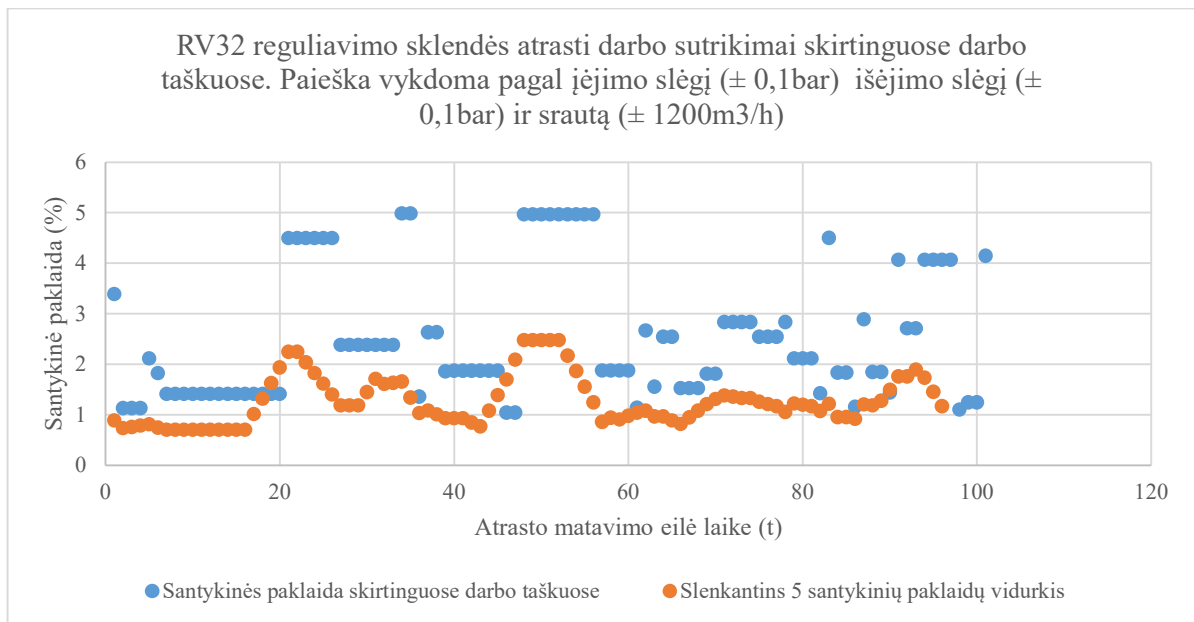
Rezultatai parodė, kad naudojant „Algoritmas_2 sumažintas“ paieškos principą (19 lentelė) su $\pm 0,1$ baro paklaida slėgių vertinimui ir 3 masyvo formavimo būdu, kai du skaičiai aprašomi vienu, pilnas vienos reguliavimo sklendės duomenų analizės algoritmas užima 36,1 % PLV atminties.



27 pav. Užimamas PLV atminties kiekis naudojant „Algoritmas_2 sumažintas“ paieškos principą ir 3 masyvo formavimo būdą.

Ilgiausias PLV vieno ciklo laikas išaugo iki 5ms naudojant paieškos principą, kuriam reikalingas 28x32x18 dimensijų masyvas. Kitais galimais paieškos principais reikalingi masyvai yra mažesnių dimensijų, todėl sunaudoja mažiau atminties. Žinant, kad šiam PLV maksimalus ilgiausias rekomenduojamas ciklas yra 250ms, galima teigti, kad sudėtingesnių matematinių operacijų apdorojimas nesudaro didelės įtakos PLV darbui, nes išekvojama tik 2% jo galimybių ir praktinis tokio algoritmo panaudojimas yra galimas.

Siekiant išsiaiškinti šio algoritmo realų pritaikymą procese, sukurtas algoritmas naudojimui PLV perkeltas į MATLAB programinę įrangą.



28 pav. RV32 reguliavimo sklendės atrasti darbo sutrikimai skirtinguose darbo taškuose paiešką vykdant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

28 pav. pavaizduotame grafike parodytos santykinų paklaidų vertės skirtinguose darbo taškuose pradedant nuo seniausio atrasto įvykio iki naujausio. Slenkantis 5 santykinų paklaidų vidurkių vaizdavimas pasirinktas dėl galimybės analizuoti ar didėja santykinės paklaidos vėlesniuose įrašuose.

Analizuojant duomenis tuose pačiuose darbo taškuose, taip pat pastebėtas santykinės paklaidos padidėjimas.

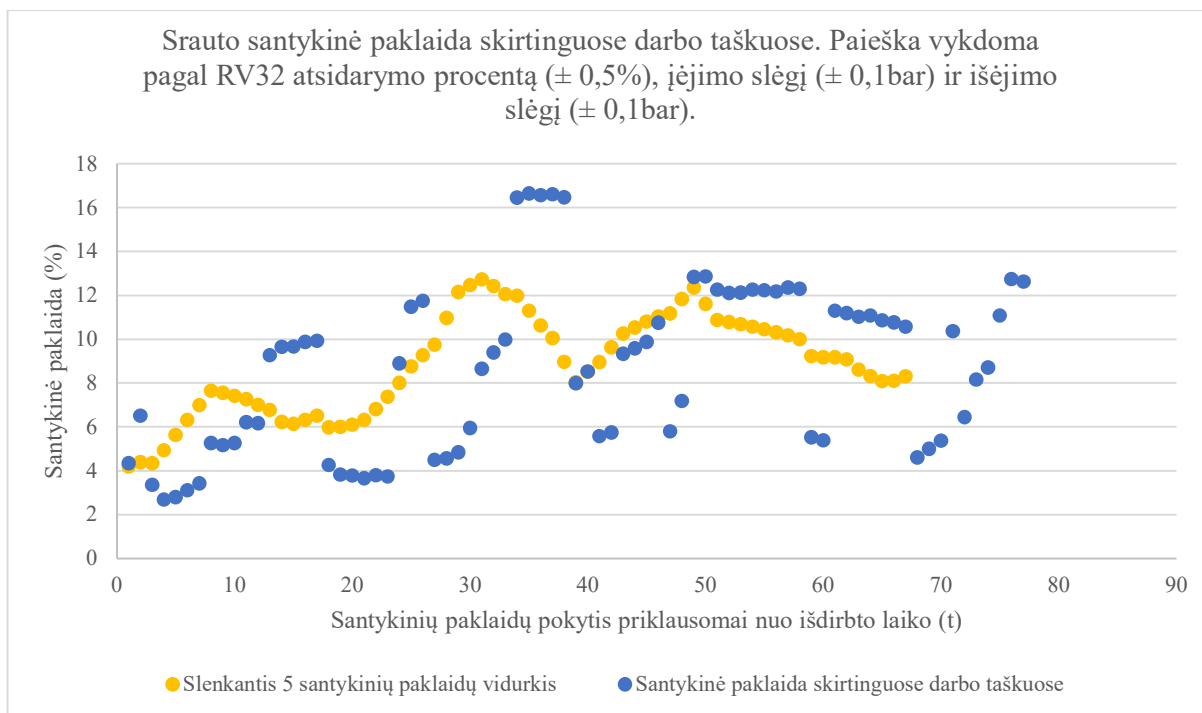
26 lentelė. RV32 reguliavimo sklendės vieno darbo taško santykinės paklaidos kitimas nuo išdirbtų valandų skaičiaus

Atrasto sutrikimo momentas (išdirbtų valandų skaičius)	Įėjimo slėgio darbo taškas (barais)	Išėjimo slėgio darbo taškas (barais)	Srauto darbo taškas (m^3/h)	Reguliavimo sklendės atsidarymo procento vidurkis darbo taške (%)	Santykinė paklaida
1731	39,0 – 39,2	31,8 – 32,0	73800 – 76200	36,6%	1,87
1732					1,87
1736					1,87
1737					1,87
1738					1,87
1739					1,87
9665					36,8%
9666	2,12				
9667	2,12				

Kaip matyti iš 26 lentelės duomenų, per 2 metų istorinį laikotarpį algoritmas aptiko RV32 reguliavimo sklendei tą patį darbo tašką pagal naudojamas paklaidas. Pradžioje užfiksuota paklaida

po 1731 – 1739 valandų darbo. Tas pats darbo taškas fiksuotas esant nusistovėjusiam procesui, nes įrašai padaryti keliose gretimose valandose. Atrasta absoliutinė santykinė paklaida visur vienoda – 1,87% nuo darbo taško vidurkio – 36,6%. Su tokia santykinė paklaida reguliavimo sklendė galėjo būti atidaryta 37,3% arba 35,9%. Vertinant pagal minimalų pavaros žingsnį pateiktą 8 lentelėje, reguliavimo sklendės pozicija užfiksuota 3,5 karto didesnė negu pavaros žingsnis. Antruoju momentu paklaida atrasta po 9665 – 9667 išdirbtų valandų. Šiuo atveju reguliavimo sklendės atsidarymo procento vidurkis padidėjo dėl pagausėjusio įrašų kiekio darbo taške. Santykinė paklaida gauta 2,12% nuo atsidarymo procento vidurkio – 36,8%. Reguliavimo sklendės pozicija galėjo būti ties 37,6% arba 36,0% verte. Palyginus su minimaliu pavaros žingsniu, užfiksuota pozicija yra didesnė 4 kartais.

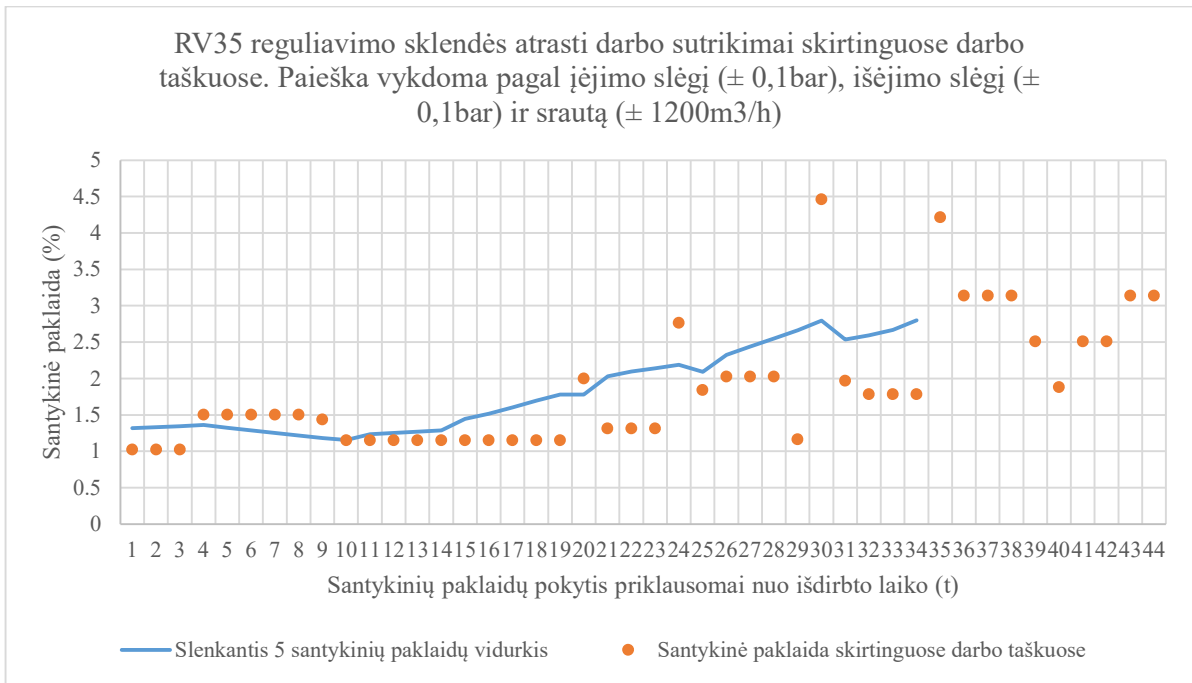
Kai darbo taškai ieškomi naudojant atsidarymo procentą, įėjimo slėgį ir išėjimo slėgį, atrastų atvejų kiekis sumažėja.



29 pav. RV32 reguliavimo sklendės atrasti darbo sutrikimai skirtinguose darbo taškuose paiešką vykdant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

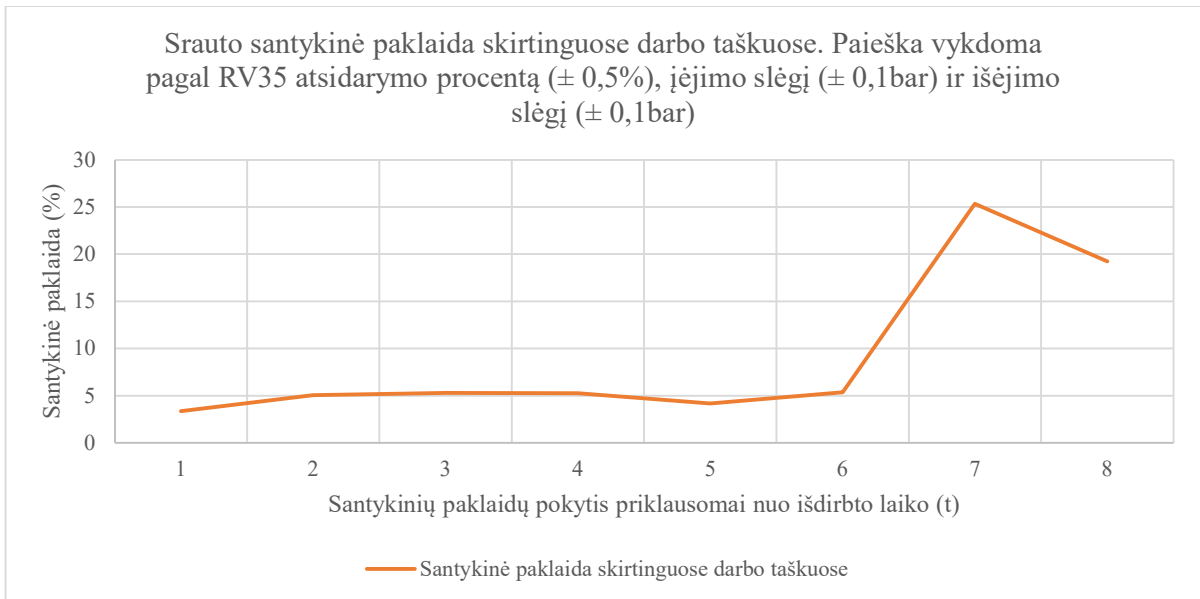
Šio paieškos principo rezultatai pateikia išraiškiau didėjančią srauto santykinę paklaidą negu prieš tai pavaizduotas atsidarymo procento santykinės paklaidos kitimas. Santykinės paklaidos taip pat didesnės – siekia iki 12 %, kai atsidarymo procento paklaidos siekia 2,7%.

RV35 reguliavimo sklendei atrasta dvigubai mažiau darbo sutrikimo atvejų. Ieškant reguliavimo sklendės atsidarymo procento nukrypimų nuo vidurkio konkrečiuose darbo taškuose atrasti 44 atvejai (30 pav.). Nuo 1 iki 15 atrastojo sutrikimo santykinė paklaida išliko $\sim 1,4\%$, o ilgėjant išdirbtam laikui paklaida pradėjo stabiliai augti ir pasiekė $\sim 2,8\%$ ribą. Tiksliai pasakyti ar tame pačiame darbo taške santykinė paklaida didėja priklausomai nuo išdirbto laiko negalima, nes trūksta istorinių duomenų.



30 pav. RV35 reguliavimo sklendės atrasti darbo sutrikimai skirtinguose darbo taškuose paiešką vykdant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

Naudojant paieškos principą pagal atsidarymo procentą, įėjimo slėgį ir išėjimo slėgį gauti tik 8 įrašai apie srauto neatitikimą nurodytai paklaidai. Srauto santykinė paklaida kito nuo 4 iki 25 procentų. Pagal gautą kreivę neįmanoma pasakyti kaip toliau kinta paklaida ilgėjant išdirbtam laikui, tačiau pradiniai neatitikimai yra aiškūs, o platesnę atrastų paklaidų analizę galima analizuoti naudojant detalų darbo taškų algoritmą.



31 pav. RV35 reguliavimo sklendės atrasti darbo sutrikimai skirtinguose darbo taškuose paiešką vykdant pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

7.2.1. Detalūs tausojančio PLV atmintį algoritmo rezultatai

Atrandant reguliavimo sklendžių darbo taškų neatitikimus naudojantis 5.2 poskyryje aprašytu algoritmu, 6.2 poskyrio rezultatams analizuoti naudojamas 5.4 poskyryje aprašytas algoritmas.

27 lentelė. RV32 reguliavimo sklendės detali analizė darbo sutrikimų taškuose naudojant paieškos principą pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

	Vidurkis	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis
Atsidarymo procentas (%)	32,83	20,6	38,5	5,56
Įėjimo slėgis (bar)	37,85	33,59	40,27	1,14
Išėjimo slėgis (bar)	28,03	19,96	31,94	3,45
Slėgio perkrytis (bar)	9,81	5,68	20,0	3,85
Srautas (m ³ /h)	56585	18071	83214	21129

28 lentelė. RV32 reguliavimo sklendės detali analizė darbo sutrikimų taškuose naudojant paieškos principą pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

	Vidurkis	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis
Atsidarymo procentas (%)	35,72	24,1	43,6	2,94
Įėjimo slėgis (bar)	36,91	32,67	39,52	0,84
Išėjimo slėgis (bar)	28,64	22,69	34,08	2,12
Slėgio perkrytis (bar)	8,26	2,19	16,83	2,59
Srautas (m ³ /h)	64344	24210	96360	12626

RV32 reguliavimo sklendės detaliose analizėse matyti tam tikri panašumai tarp naudotų paieškos principų. Atrastų atvejų atsidarymo procento vidurkiai skyrėsi ~ 9%, įėjimo slėgiai ~ 2%, išėjimo slėgiai ~ 2%, o srautai ~ 12%. Iš minimalių ir maksimalių parametrų verčių būtų galima sakyti, kad atrastos santykinės paklaidos nepriklauso nuo tam tikro srauto, slėgio ar atsidarymo procento, nes kinta dideliuose diapazonuose. Iš standartinių nuokrypių kiekvienam parametrai, mažiausias nuokrypis fiksuotas abejais atvejais įėjimo slėgiui, atitinkamai 1,14 baro ir 0,84 baro. Atsižvelgiant į tai, kad įėjimo slėgių vidurkiai skyrėsi tik 2% ir buvo atitinkamai 37,85 baro ir 36,91 baro, galima daryti išvadą, kad esant tokiam įėjimo slėgiui išauga tikimybė nukrypti nuo darbo taško vidurkio.

Atliekant tokią pačią analizę RV35 reguliavimo sklendei fiksuoti panašūs rezultatai. Atsidarymo procento vidurkiai fiksuoti atitinkamai 27,28% ir 33,96% priklausomai nuo naudojamo paieškos principo. Įėjimo slėgio vidurkiai taip pat skyrėsi ~ 2% (38,16bar ir 37,28bar), o fiksuoti standartiniai nuokrypiai – mažiausi. Kaip ir RV32 reguliavimo sklendei, darbo taškui esant ties ~ 38 barų įėjimo slėgiu, išauga tikimybė nukrypti nuo darbo taško normų.

29 lentelė. RV35 reguliavimo sklendės detali analizė darbo sutrikimų taškuose naudojant paieškos principą pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

	Vidurkis	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis
Atsidarymo procentas (%)	27,28	18,5	35	6,82
Įėjimo slėgis (bar)	38,16	33,31	43,44	1,85

Išėjimo slėgis (bar)	26,77	22,93	29,77	2,44
Slėgio perkrytis (bar)	11,39	7,87	18,23	3,02
Srautas (m ³ /h)	42394	14104	71841	23998

Naudojantis 31 pav. srauto santykinės paklaidos kreive, iš turimų 8 matavimų sunku pasakyti ar tokio paieškos principo panaudojimas yra veiksmingas RV35 reguliavimo sklendės darbo sutrikimų fiksavimui, tačiau detalesnio analizės algoritmo gauti rezultatai yra informatyvesni. Kaip ir kitos paieškos principo atveju fiksuotas panašus įėjimo slėgis 37,28 barai ir atitinkamai 38,16 barų. Įvertinus šio paieškos principo rezultatą, kai vidurkio ir standartinio nuokrypio suma viršija maksimalią nustatytą reikšmę, galima teigti, kad vidurkis suformuotas iš arčiau maksimalios vertės esančių matavimų. Kadangi maksimali vertė yra 38,09 baro, tai analogiškai santykinų paklaidų kiekis atrastas arčiau maksimalios vertės yra didesnis. Mažiausias standartinis nuokrypis nustatytas slėgio perkryčiui – 0,68 baro, tačiau tai gali būti susiejama su mažu nustatytų atvejų skaičiumi ir paklaidų fiksavimu tame pačiame darbo taške.

30 lentelė. RV35 reguliavimo sklendės detali analizė darbo sutrikimų taškuose naudojant paieškos principą pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

	Vidurkis	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis
Atsidarymo procentas (%)	33,96	27,7	35,1	2,39
Įėjimo slėgis (bar)	37,28	32,57	38,09	1,78
Išėjimo slėgis (bar)	28,42	22,83	30,18	2,21
Slėgio perkrytis (bar)	8,86	7,74	9,74	0,68
Srautas (m ³ /h)	67144	38319	73856	11826

Sprendžiant iš visų gautų rezultatų RV32 ir RV35 reguliavimo sklendėms naudojant skirtingus paieškos principus darbo sutrikimams nustatyti, pastebėta, kad didžiausia tikimybė nukrypti nuo darbo taško yra esant įėjimo slėgiui 37 – 39 barų riboje. Vertinant pagal kitus parametrus reikšmingesnių nuokrypių ar analogijų nepastebėta ir santykinų paklaidų atsiradimas kinta plačiuose diapazonuose.

7.2.2. RV32 ir RV35 rezultatų palyginimas tuose pačiuose darbo taškuose

Analizuojant reguliavimo sklendes kuriant tokio paties tipo darbo taškus (naudojant vienodus masyvų dydžius, paklaidas ir parametrų ribas), galima atlikti reguliavimo sklendžių tarpusavio analizę tuose pačiuose darbo taškuose. Kadangi RV35 reguliavimo sklendės išdirbtas valandų kiekis yra dvigubai mažesnis, kas atsispindi rezultatuose, todėl siekiant padidinti atrastų įrašų kiekį, PLV skirtam algoritmo sukauptų įrašų kiekis aliarmavimui sumažintas nuo 5 iki 4. Darbo taškų suformavimo kiekio sumažinimas leido padidinti atrastų įvykių skaičių nuo 3 iki 20. Taip pat tarpusavio palyginimas atliktas tik paieškos principu pagal įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą dėl didesnio duomenų kiekio.

31 lentelė. RV32 ir RV35 tarpusavio palyginimas tuose pačiuose darbo taškuose.

Absoliutinė atsidarymo procento paklaida (%)	Santykinė atsidarymo paklaida (%)	RV32 vidutinis atsidarymo % darbo taške	RV35 vidutinis atsidarymo % darbo taške	Vidutinio įėjimo slėgio santykinė paklaida	Vidutinio išėjimo slėgio santykinė paklaida	Vidutinio srauto santykinė paklaida
1,5	4.6875	33.5	32	0.025609416	0.504508191	0.014568948
1	2.403846154	42.6	41.6	0.025609416	0.229258734	0.035759605
1,1	5.11627907	22.6	21.5	0.045929511	1.247921845	0.064359852
1,1	5.11627907	22.6	21.5	0.045929511	1.247921845	0.213253909
1,1	3.492063492	32.6	31.5	0.045929511	0.866816541	0.218390124
2,2	10.78431373	22.6	20.4	0.027442372	2.700842466	0.088692827
0,9	4.433497537	21.2	20.3	0.026691961	1.256453315	0.077050007
2,2	10.78431373	22.6	20.4	0.026691961	0.076504298	0.125668771
2,06	5.984555985	36.6	34.53333333	0.075602059	0.655847301	0.201072106
2,3	6.705539359	36.6	34.3	0.004838457	0.058121369	0.039352235
2,44	7.122032486	36.74285714	34.3	0.004838457	0.267221864	0.108761805
1,7	5.074626866	35.2	33.5	0.038349179	0.227287868	0.080655854
1,8	8.571428571	22.8	21	0.000119713	0.998630585	0.185650914
1,9	9.047619048	22.9	21	0.000119713	0.998630585	0.041619072
1,8	8.571428571	22.8	21	0.006078528	0.204590026	0.019120262
2	9.216589862	23.7	21.7	0.019108904	0.980433211	0.197836261
0,33	1.550832855	22.1	21.7625	0.032369933	1.6572612	0.342590236
1,1	5.140186916	22.5	21.4	0.032369933	1.6572612	0.069208743
0,4	1.843317972	22.1	21.7	0.055844544	1.833179584	0.0824264
0,4	1.843317972	22.1	21.7	0.055844544	1.833179584	0,332418117

31 lentelėje pateikti rezultatai rodo RV32 ir RV35 reguliavimo sklendžių palyginimą tarpusavyje tuose pačiuose darbo taškuose. Kiekviena eilutė rodo naujo darbo taško įvertinimą. Iš viso atrasti 20 tokių pačių darbo taškų, kai vienam darbo taškui formuoti naudojami 4 valandų duomenys. Iš rezultatų matyti, kad absoliuti paklaida varijuoja nuo 0,4 iki 2,44 atsidarymo procento, o santykinė paklaida nuo 1,84% iki 7,12%. Kaip ir minėta 5.3 poskyryje, esant tokiam pačiam darbo taškui, reguliavimo sklendžių atsidarymo procentai turėtų sutapti, tačiau net 20 darbo taškų taip nėra. Šiuo atveju tai yra svarus kriterijus, nurodantis, kad reguliavimo sklendėms reikalinga techninė patikra.

7.3. Istorinio duomenų analizės ir tausojančio PLV atmintį algoritmų rezultatų palyginimas

Rezultatai tarp istorinių duomenų analizės algoritmo ir algoritmo skirto PLV pateikti 32 lentelėje. RV32 reguliavimo sklendei 6.1 poskyryje aprašytu algoritmu atrasti 852 aliarminiai įvykiai, o

naudojant 6.2 algoritmą – 102 įvykiai. Atrastų įvykių skaičius skiriasi daugiau negu 8 kartus, nes antruoju atveju prieš formuojant aliarmą, tam pačiam darbo taškui turi būti sukaupti bent 5 įvykiai.

32 lentelė. RV32 reguliavimo sklendės surastų aliarminių įvykių analizė naudojant 5.1 ir 5.2 poskyriuose aprašytais algoritmais ir paieškai naudojant įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

	Vidurkis		Minimali vertė		Maksimali vertė		Standartinis nuokrypis	
	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai
Atsidarymo procentas (%)	28,19	32,82	20,3	20,6	38,5	38,5	6,93	5,56
Įėjimo slėgis (bar)	37,99	37,85	34,05	33,59	43,50	40,27	1,16	1,14
Išėjimo slėgis (bar)	26,88	28,03	20,1	19,96	31,88	31,94	3,67	3,45
Slėgio perkrytis (bar)	11,11	9,81	5,86	5,68	22,28	20,0	4,37	3,85
Srautas (m ³ /h)	42800	56585	17904	18071	84157	83214	25448	21129

Iš 32 lentelės duomenų matyti, kad abejais atvejais atsidarymo procento ribinės vertės sutapo (20,3% ir 38,5%), tačiau skyrėsi vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai. Įėjimo slėgio vidurkis ir standartinis nuokrypis skiriasi mažiau negu 1%, bet skiriasi atrastos ribinės vertės. Išėjimo slėgio ribinės vertės skiriasi mažiau negu 1%, o standartinis nuokrypis ir vidurkis ~6%. Visi slėgio perkryčio rodikliai skiriasi daugiau negu 3% ir tai galima paaiškinti nevienodai besiskiriančiais įėjimo ir išėjimo slėgiais. Srauto ribinės vertės praktiškai sutapo, o vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai skyrėsi.

33 lentelė. RV32 reguliavimo sklendės surastų aliarminių įvykių analizė naudojant 5.1 ir 5.2 poskyriuose aprašytais algoritmais ir paieškai naudojant įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir atsidarymo procentą.

	Vidurkis		Minimali vertė		Maksimali vertė		Standartinis nuokrypis	
	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai
Atsidarymo procentas (%)	31,1	35,73	20,3	24,1	42,6	43,6	6,58	2,94
Įėjimo slėgis (bar)	37,62	36,91	34,01	32,67	42,81	39,52	1,44	0,84
Išėjimo slėgis (bar)	27,24	28,64	20,24	22,69	32,19	34,08	3,05	2,12
Slėgio perkrytis (bar)	10,37	8,26	2,28	2,19	20,01	16,82	4,08	2,59
Srautas (m ³ /h)	49619	64344	17708	24210	102164	96360	22387	12626

Paieškai naudojant atsidarymo procentą, įėjimo ir išėjimo slėgius užfiksuoti didesni neatitikimai. Mažiausiai skyrėsi atsidarymo procento maksimali vertė (~3%) ir slėgio perkryčio minimalios vertės (~4%), visų kitų parametru skirtumai didesni.

34 lentelė. RV35 reguliavimo sklendės surastų aliarminių įvykių analizė naudojant 5.1 ir 5.2 poskyriuose aprašytais algoritmais ir paieškai naudojant įėjimo slėgį, išėjimo slėgį ir srautą.

	Vidurkis		Minimali vertė		Maksimali vertė		Standartinis nuokrypis	
	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai	5.1 alg. rezultatai	5.2 alg. rezultatai
Atsidarymo procentas (%)	27,935	27,28	19,5	18,5	35	35	5,52	6,82
Įėjimo slėgis (bar)	37,69	38,16	34,146	33,31	43,87	43,44	1,49	1,85
Išėjimo slėgis (bar)	26,813	26,77	22,91	22,93	31,15	29,77	1,84	2,44
Slėgio perkrytis (bar)	10,88	11,38	6,21	7,87	18,46	18,23	2,06	3,02
Srautas (m ³ /h)	41172	42394	16958	14104	71684	71841	18766	23998

RV35 reguliavimo sklendei gauti panašesni rezultatai. Labiau neatitiko rasta atsidarymo procento minimali reikšmė, įėjimo slėgio minimali vertė ir standartinis nuokrypis, išėjimo slėgio maksimali vertė bei standartinis nuokrypis. Slėgio perkryčio tik maksimali vertė skyrėsi 1%, o srautui neatitiko minimalios vertės ir standartiniai nuokrypiai.

RV35 reguliavimo sklendei nepateiktas rezultatų palyginimas tarp dviejų algoritmų paieškai naudojant atsidarymo procentą, įėjimo ir išėjimo slėgius dėl per mažo atrastų atvejų skaičiaus naudojant PLV sukurtą algoritmą.

7.4. Algoritmų, skirtų PLV, palyginimas

Apibendrinant 7 skyriaus rezultatus galima pasakyti, kad naudojant abu algoritmus: istorinių duomenų analizės ir algoritmą paruoštą naudojimui PLV, galima aptikti reguliavimo sklendės darbo sutrikimus.

35 lentelė. Algoritmų skirtų PLV palyginimas

Rodikliai	Paieškos principo kodas			
	Algoritmas_2 sumažintas		Algoritmas_3	
	RV32	RV35	RV32	RV35
Atrastų įvykių skaičius	102	44	78	8
Santykinių paklaidų vidurkis klaidų registre (%)	2,55	1,87	8,63	9,13
Užimamas atminties kiekis PLV (%)	36,1	36,1	35,5	35,5
PLV maksimalus ciklo laikas (ms)	5	5	5	5

Įvertinus rezultatus RV32 ir RV35 reguliavimo sklendėms, naudojant PLV algoritmą, darbo taškus galima formuoti abejais būdais, nes rezultatai yra labai panašūs atrastų atvejų skaičiumi. Santykinių paklaidų vidurkiai skiriasi kartais dėl ieškomų parametrų (atsidarymo procento arba srauto paklaidos) ir jų kitimo režijų. Užimamas atminties kiekis tarp abiejų paieškos principų realizavimo PLV skiriasi tik 1,87%, o maksimalus vykdymo laikas yra vienodas.

Naudojant darbo taškų formavimo algoritmą ir detalios analizės algoritmą galima operatoriui ar technologui pateikti aiškų kylančių avarinių įvykių vaizdą, nes minimalios ir maksimalios atrastos vertės parodo kokiame diapazone atsiranda darbo sutrikimai, o vidurkis ir standartinis nuokrypis – ar aliarmai gaunami arti vidurkio, ar kinta platesniame diapazone. PLV skirto algoritmo išbandymas naudojant realią techninę įrangą parodė, kad užimamas atminties kiekis pilnai vienos reguliavimo sklendės analizei užima trečdalį galimos atminties, todėl gali būti realizuojamas realioje pramoninėje sistemoje.

Išvados

1. Literatūros analizė dujų reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų nustatymo tema parodė, kad tyrimai atlikti analizuojant pačios reguliavimo sklendės vidinius parametrus. Tyrimai remiasi ne realiuoju laiku atliekama proceso analize ir reikalauja papildomų resursų norint nustatyti ar egzistuoja darbo sutrikimai.
2. Dujų reguliavimo sklendžių darbo sutrikimams fiksuoti pasiūlytas būdas, kai analizuojant vykstančio proceso parametrus formuojami įrenginio darbo taškai bei jiems stebimas pokytis ilguoju darbo laikotarpiu. Šiame darbe atlikti dvejopi tyrimai sudarant algoritmus dujų reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų nustatymui: 1) istorinių duomenų analizė skirtingais paieškos metodais; 2) darbo taškų sukūrimo galimybės algoritmo naudojimui PLV.
3. Išanalizavus dujų stotyse naudojamą techninę ir programinę įrangą nustatyta, kad yra ribojamas maksimalus galimo sukurti masyvo dydis. Problemai išspręsti sukurtas optimizavimo algoritmas, kuris leidžia ~12 kartų sumažinti reikalingos atminties kiekį.
4. Istorinių duomenų analizei naudoti paieškos principai pagal: 1) srautas, įėjimo ir išėjimo slėgiai, ieškant atsidarymo procento santykinės paklaidos; 2) atsidarymo procentas, įėjimo ir išėjimo slėgiai, ieškant srauto santykinės paklaidos. Naudojant pirmąjį paieškos principą nustatyta, kad išauga atsidarymo procento santykinė paklaida ilguoju darbo periodu, o antruoju paieškos principu rastos srauto santykinės paklaidos išlaiko pastovią reikšmę. Taip pat nustatyta, kad naudojantis 1 paieškos principu, atrastų atvejų skaičius buvo 5 – 6 kartus didesnis.
5. Algoritmo, sukurto naudoti PLV, naudojantis tais pačiais paieškos principais kaip istorinei duomenų analizei, rezultatai parodė, kad abejais paieškos principais ilguoju darbo periodu išauga ieškomų parametrų santykinės paklaidos. Atrastų atvejų skaičius RV32 ir RV35 reguliavimo sklendėms atitinkamai skyrėsi 12% ir 25%.
6. Sukurtas detalios įvykusių darbo sutrikimų analizės algoritmas parodantis parametrų kitimo ribas, vidurkį ir standartinį nuokrypį, kuriuos įvertinus galima pasakyti kokiuose darbo taškuose yra linkę atsirasti darbo sutrikimai.
7. Tyrimas parodė, kad galima praktikoje naudoti sukurtus algoritmus dujų stočių pažengusių aliarmų generavimui ieškant reguliavimo sklendžių darbo sutrikimų.

Literatūros saraksts

1. Tsukasa Ishigaki, Tomoyuki Higuchi, Kajiwo Watanabe. Spectrum Classification for Early Fault Diagnosis of the LP Gas Pressure Regulator Based on Kullback-Leibler Kernel. 2006 16th IEEE Signal Processing Society Workshop on Machine Learning for Signal Processing. Rugsējis 2006. [žiūrēta 2019-06-07]. Prieiga per: Ieeexplore.
2. S. Poyhonen, M. Negrea, A. Arkkio, H. Hyotyniemi, H. Koivo. Fault diagnostics of an electrical machine with multiple support vector classifiers. 2002 IEEE International Symposium Intelligent control., pp. 373-378. [žiūrēta 2019-06-08]. Prieiga per: Ieeexplore.
3. Krechkovska, H.V. Mytsyk, A.B., Student, O.Z. et al. Diagnostics Indications of the In-Service Degradation of the Pressure Regulator of a Gas-Transportation System. Mater Sci 52, 233 – 239 2016. [žiūrēta 2019-06-23]. Prieiga per: Springer.
4. An Yun, Wang Yahui, Liu Yuexiao. Research on Gas Pressure Regulator Fault Diagnosis Based on Deep Confidence Network (DBN) Theory. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Spalis 2017. [žiūrēta 2019-07-15]. Prieiga per: ResearchGate.
5. P. Tamilselvan, P. Wang. Failure diagnosis using deep belief learning based health state classification [J]. Reliability Engineering & System safety, vol. 115, no. 7, pp. 124- 135. 2013. [žiūrēta 2019-07-15]. Prieiga per: ScienceDirect.
6. D. Yinxing, WHuaixiu, W. Yahui, C. Fangwen. Research on fault diagnosis algorithm of gas pressure regulator based on compressed sensing theory. 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Chongqing. 2017. [žiūrēta 2019-09-28]. Prieiga per: Ieeexplore.
7. D. L. Donoho. Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, Balandis 2006. [žiūrēta 2019-09-28]. Prieiga per: Ieeexplore.
8. J. Jiao et al. A gas regulator fault detecting method based on acoustic emission technology. 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), Chengdu. 2017. [žiūrēta 2019-10-03]. Prieiga per: Ieeexplore.
9. D. Chang. Microdynamic modeling of acoustic emission in machining. 2004. [žiūrēta 2019-10-03]. Prieiga per: ProQuest.
10. AA Houshmand, JE Kannatey-asibu, GD. Herrin. A dynamic model for tool wear detection using acoustic emission. Mechanical Systems and Signal processing, vol 9., no. 4, pp. 415-428. 1995. [žiūrēta 2019-10-03]. Prieiga per: ScienceDirect.
11. Hao Xuejun, An Xiaoran, Wu Bo, He Shaoping. Application of a Support Vector Machine Algorithm to the Safety Precaution Technique of Medium-low Pressure Gas Regulators. 2018. China. [žiūrēta 2020-01-09]. Prieiga per: Springer.
12. Tian, Shen & Bian, Xiaoyo & Tang, Zhipeng & Yang, Kuan & Li, Lei. Fault Diagnosis of gas Pressure Regulators Based on CEEMDAN and Feature Clustering. September 2019. China. [žiūrēta 2020-01-12]. Prieiga per: ResearchGate.
13. Ji, Yongjian, and Hongjun Wang. A Revised Hilbert-Huang Transform and Its Application to Fault Diagnosis in a Rotor System. December 2018. China. [žiūrēta 2020-01-12]. Prieiga per: ResearchGate.
14. Manish Sharma, Ram Bilas Pachori, U. Rajendra Acharya. A new approach to characterize epileptic seizures using analytic time-frequency flexible wavelet transform and fractal dimensions. July 2017. [žiūrēta 2020-01-12]. Prieiga per: ScienceDirect.

15. Mejia, Arturo & Valtierra-Rodriguez, Martin & Granados-Lieberman, David & Olivares-Galvan, Juan & Escarela-Perez, Rafael. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents. December 2017. [žiūrēta 2020-01-13]. Prieiga per: ScienceDirect.
16. Rami El Golli, Jean-Jacques Beziau, Bruno Delenne, Francois Menu. Modelling of a pressure regulator. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier, 2007, 84 (4), p. 234-43. [žiūrēta 2020-01-15]. Prieiga per: hal.archives-ouvertes.fr
17. A. R. Shahani, H. Esmaili, A. Aryaei, S. Mahommadi, M. Najar. Dynamic simulation of a high pressure regulator, 2011, Iran. [žiūrēta 2020-01-15]. Prieiga per: jcarme.sru.ac.ir
18. EEMUA-191: alarm systems a guide to design, management, and procurement. London: Engineering Equipment and Materials Users Association; 2007.
19. ANSI/ISA-18.2: management of alarm systems for the process industries. North Carolina: International Society of Automation; 2009.
20. I. Izadi, S.L. Shah, D.S. Shook, S.R. Kondaveeti, T. Chen, A framework for optimal design of alarm systems. 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 2009, (651–656). [žiūrēta 2019-10-07]. Prieiga per: ScienceDirect.
21. H. Zang, F. Yang, D. Huang, Design and Analysis of Improved Alarm Delay-Timers, China, 2015. [žiūrēta 2019-09-18]. Prieiga per: ScienceDirect.
22. D.C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control, Wiley, New York, 2004.
23. Tamiru Alemu Lemma, A Hybrid Approach for Power Plant Fault Diagnostics, 2018. Springer.
24. Fagarasan I., St. Illiescu S., Parity equation for fault detection and isolation. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. [žiūrēta 2019-11-28]. Prieiga per: Ieeexplore.