



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Garso tunelio valdymo sistemų modeliavimas ir tyrimas

Magistro baigiamasis projektas

Tomas Liubševičius

Projekto autorius

lekt. prakt. dr. Kęstutis Brazauskas

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Garso tunelio valdymo sistemų modeliavimas ir tyrimas

Magistro baigiamasis projektas

Valdymo technologijos (kodas 6211EX014)

Tomas Liubševičius

Projekto autorius

lekt. prakt. dr. Kęstutis Brazauskas

Vadovas

asist. dr. Jolanta Repšytė

Recenzentė

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tomas Liubševičius

Garso tunelio valdymo sistemų modeliavimas ir tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Tomas Liubševičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Liubševičius Tomas. Garo tunelio valdymo sistemų modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. prakt. dr. Kęstutis Brazauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: valdymo sistema, modeliavimas, identifikavimas, perdavimo funkcija.

Kaunas, 2025. 45 p.

Santrauka

Šiame darbe atlikta literatūros analizė apie automatinių valdymo sistemų struktūras, PID reguliatorių struktūras, reguliatorių derinimo metodus ir PID reguliatorių realizaciją pramoniniuose valdikliuose. Išanalizuojama garo tunelio technologinė linija, jos atliekamas technologinis procesas – emulsijos kaitinimas garu bei joje esančios valdymo sistemos: viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistema ir apatinio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistema. Atliekami šuolinės reakcijos eksperimentai, pagal kuriuos identifikuotos tiriamose valdymo sistemose esančios objektų perdavimo funkcijos. Sudaromi tiriamų valdymo sistemų modeliai MATLAB/Simulink programiniame pakete. Tiriamose valdymo sistemose skirtingais reguliatorių derinimo metodais suderinti PI ir PID reguliatoriai. Atliekama esamos valdymo sistemos modifikacija modelyje, pakeičiant jos valdymo struktūrą. Pateikiami tyrimų rezultatai ir išvados.

Liubševičius Tomas. Modelling and research of steam tunnel control systems. Master's Final Degree Project / supervisor lect. pract. dr. Kęstutis Brazauskas; Faculty of Electronical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics engineering (engineering science).

Keywords: control system, modelling, identification, transfer function.

Kaunas, 2025. 45 p.

Summary

This work presents a literature review on the structures of automatic control systems, PID controller structures, controller tuning methods, and the implementation of PID controllers in industrial controllers. The steam tunnel technological line and its technological process – steam heating of emulsion – are analyzed, along with its control systems: the steam flow control system for the upper hood and the temperature maintenance control system for the lower hood. Step response experiments are carried out to identify the transfer functions of the objects in the studied control systems. Models of the investigated control systems are developed using the MATLAB/Simulink software package. PI and PID controllers are tuned with reviewed control systems using various tuning methods. The existing control system is being modified in the model by changing its control. The research results and conclusions are presented.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga ir analizė.....	11
1.1. Technologinių procesų valdymo sistemų struktūros	11
1.1.1. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema.....	11
1.1.2. Tiesioginio grįžtamojo ryšio valdymo sistema.....	11
1.1.3. Santykio reguliavimo valdymo sistemos.....	12
1.1.4. Adaptyvaus valdymo sistemos	13
1.1.5. Pakopinės valdymo sistemos	14
1.2. Reguliatorių struktūros valdymo sistemose.....	14
1.2.1. P reguliavimo dėsnio algoritmas	15
1.2.2. PI reguliavimo dėsnio algoritmas	15
1.2.3. PD reguliavimo dėsnio algoritmas	16
1.2.4. PID reguliavimo dėsnio algoritmas	16
1.3. PID reguliatorių derinimo metodai.....	17
1.3.1. Ziegler-Nichols metodas.....	17
1.3.2. Cohen-Coon reguliatorių derinimo metodas	19
1.3.3. Vidinio modelio valdymo (IMC) reguliatorių derinimo metodas	19
1.3.4. Chien Hrones Reswick reguliatorių derinimo metodai	20
1.4. PID reguliatorių realizavimas pramoniniuose valdikliuose.....	21
1.4.1. PID reguliatorių realizavimas „Siemens“ valdikliuose	21
1.4.2. PID reguliatorių realizavimas „Schneider Electric“ valdikliuose	22
1.4.3. PID reguliatorių realizavimas „Allen-Bradley“ valdikliuose.....	23
2. Garo tunelio technologinės linijos valdymo sistemų tyrimas	25
2.1. Garo tiekimas į viršutinį ir apatinį tunelio dangčius.....	25
2.2. Garo tunelio valdymo sistemų problematika.....	27
2.3. Garo tunelio technologinės linijos valdymo objektų tyrimas	28
2.4. Proceso perdavimo funkcijų identifikavimas	30
3. Garo tunelio valdymo sistemų modeliavimas	33
3.1. Garo tunelio valdymo sistemų modeliai.....	33
3.2. Esamų valdymo sistemose naudojamų PI reguliatorių derinimas	34
3.3. Esamoms valdymo sistemoms pritaikyti PID reguliatoriai	37
3.4. Valdymo sistemos struktūros keitimas	40
Išvados	43
Informacinių ir literatūros šaltinių sąrašas.....	44
Priedai.....	46
1 priedas. Algoritmas perdavimo funkcijos parametrų identifikavimui.....	46

Lentelių sąrašas

1 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu [14].....	17
2 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų derinimo formulės pirmos eilės su vėlavimu modaliui pagal Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodą [4]	18
3 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu [14].....	18
4 lentelė. P, PI, PD ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Cohen-Coon metodu [15]..	19
5 lentelė. PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės pirmos eilės su vėlavimu procesui vidinio modelio valdymo metodu [16]	20
6 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Chien Hrones Reswick metodais [17].....	20
7 lentelė. Viršutiniame dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais	35
8 lentelė. Apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais	37
9 lentelė. Viršutiniame dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos PID reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais	38
10 lentelė. Apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos PID reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais	40

Paveikslų sąrašas

1 pav. Grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [3].....	11
2 pav. Tiesioginio grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [4].....	12
3 pav. Pirma santykio reguliavimo sistemos schema [4]	13
4 pav. Antra santykio reguliavimo sistemos schema [4].....	13
5 pav. Netiesioginės adaptyvaus valdymo sistemos struktūrinė schema [6]	13
6 pav. Pakopinės reguliavimo sistemos struktūrinė schema [7]	14
7 pav. Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu atliekamas proceso reakcijos tyrimas ir parametrų L bei T identifikavimas [14]	17
8 pav. Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu atliekamas proceso reakcijos tyrimas ir parametrų K_{cp} bei P_{cr} identifikavimas [14].....	18
9 pav. Pritaikytas vidinio modelio valdymas (IMC) grįžtamojo ryšio valdymo sistemoje modelis [16]	19
10 pav. Garo tunelio principinė struktūrinė schema, su pažymėtais aktualiausiais elementais tyrimui	25
11 pav. Garo tiekimo garo tunelio dangčiams automatizavimo schema.....	26
12 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto struktūrinė valdymo sistemos schema	26
13 pav. Apatinio dangčio temperatūros struktūrinė valdymo sistemos schema	26
14 pav. Tiekiamo garo palaikymas į viršutinį dangtį valdymas.....	27
15 pav. Temperatūros palaikymo apatiniame dangtyje valdymas	28
16 pav. Viršutinio dangčio garo srauto šuolinė reakcija	28
17 pav. Apatinio dangčio temperatūros šuolinė reakcija	29
18 pav. Apatinio dangčio temperatūros šuolinė reakcija į trikdantį poveikį.....	29
19 pav. $W_{garo\ srauto}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis	31
20 pav. $W_{temperatūros}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis	32
21 pav. $W_{trikdžio}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis	32
22 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos modelis.....	33
23 pav. Apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos modelis	33
24 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės, reaguojant į šuolį, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius	34
25 pav. Grafikas aukščiau – apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į šuolį proceso trikdyme, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius. Grafikas žemiau – trikdžio šuolis procese.....	36
26 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės, reaguojant į vienetinį šuolį nuostate, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius.....	38
27 pav. Viršuje – apatinio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostate ir proceso trikdyme, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas.....	39
28 pav. Modifikuotas apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos modelis, įvertinus ryšius tarp valdymo sistemos kontūrų, papildant esamą sistemos struktūrą trikdžio kompensavimo grandimi. 41	
29 pav. Viršuje – modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostate ir proceso	

trikdyje, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas.....	41
30 pav. Viršuje – modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostate ir proceso trikdyje, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas.....	42

Ivadas

Pramonė visais laikais buvo konkurencinga ir siekianti vis didesnio efektyvumo bei geresnės gaminio kokybės. Pakeisti įrenginį nauju, jį perdaryti, pritaikyti jam naujų komponentų ar technologijų yra brangu. Šiais laikais, įrenginių efektyvumui ir kokybės rodikliams pagerinti dažnai yra tobulinamos technologinių procesų automatinės valdymo sistemos. Pirmiausia turi būti įvertinta kokia valdymo sistemos struktūra būtų tinkamiausia technologiniam procesui valdyti, jį išanalizuojant. O įdiegus parinktą valdymo sistemą, ją reikia tinkamai suderinti, tam yra reikalinga išmanyti automatinių reguliavimo sistemų derinimo metodus.

Darbe yra atliekama garo tuneliui tiekiamo garo automatinių valdymo sistemų tyrimas. Susiduriama su problema, kad garo tunelio temperatūros ir garo srauto valdymo sistemos nepakankamai greitai ir kokybiškai veikia, kas kelia riziką pagaminti nekokybišką produktą.

Darbo tikslas – ištirti garo tunelio temperatūros ir garo srauto reguliavimo sistemas ir pasiūlyti patobulinimus gerinančius valdymo kokybę.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti literatūros analizę apie automatinių valdymo sistemų struktūras, PID reguliatorių struktūras, reguliatorių derinimo metodus ir PID reguliatorių realizaciją pramoniniuose valdikliuose;
2. išanalizuoti garo tunelio technologinę liniją, jos atliekamą technologinį procesą, jam esančias valdymo sistemas ir pagal surinktus eksperimentinius duomenis identifikuoti valdymo įtaisų perdavimo funkcijas;
3. sumodeliuoti esamas valdymo sistemas ir reguliatorius MATLAB/Simulink programiniame pakete, atlikti valdymo sistemų kokybės vertinimo tyrimą, suderinant reguliatorius skirtingais reguliatorių derinimo metodais;
4. atlikti tiriamų valdymo sistemų kokybės vertinimo tyrimą, pakeičiant jose reguliatorių ir valdymo sistemų struktūras.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

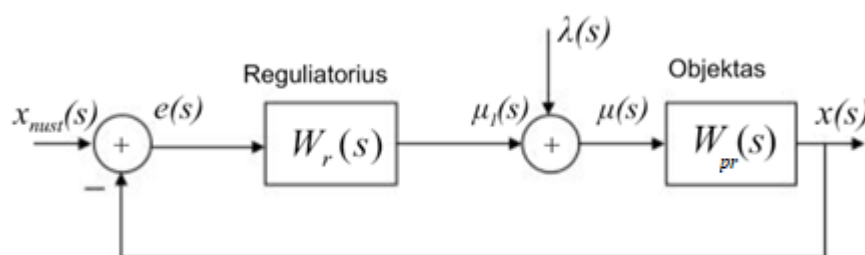
1.1. Technologinių procesų valdymo sistemų struktūros

Skyriuje atliekama apžvalga apie procesų valdymo sistemų struktūras, kurios yra dažniausiai naudojamos procesuose, kuriuose yra valdomas garo srautas [1]. Apžvelgiamos tokios valdymo sistemų struktūros: grįžtamojo ryšio, tiesioginio grįžtamojo ryšio, santykio reguliavimo, adaptyvaus ir pakopinio. Kiekviena automatinio reguliavimo sistema susideda iš reguliavimo objekto ir regulatoriaus, apimančio parametro matavimo elementą, valdymo ir vykdymo įtaisus.

1.1.1. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema

Viena iš paprasčiausių ir dažniausiai taikomų technologinių procesų valdymo sistemų struktūrų yra grįžtamojo ryšio. Šios valdymo sistemos paprastumas slypi už to, jog jas projektuojant nereikia labai tikslių modelių, nes sistemos geba kompensuoti proceso išėjimo nuokrypius $e(s)$, nepriklausomai nuo jas keliančių priežasčių [2]. Funkcionavimo esmė yra ta, kad išmatuota valdymo objekto išėjimo reikšmė $x(s)$ yra grąžinama. Valdantis poveikis $\mu_1(s)$ (valdiklio $W_r(s)$ išėjimo signalas) šio tipo sistemoje nustatomas remiantis grįžtamojo ryšio informacija. Todėl šio tipo sistemos vadinamos grįžtamojo ryšio valdymo sistemomis. Tačiau šios sistemos turi sulaukti trikdancio poveikio $\lambda(s)$ sukulto išėjimo pokyčio, kad suformuotų koreguojantį valdantį signalą $\mu(s)$, todėl valdiklio sprendimai yra priimami jau po laiko.

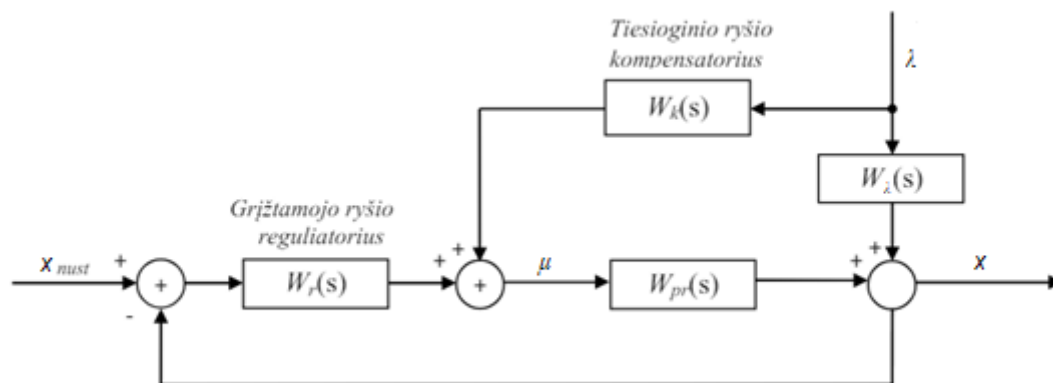
Bendroju atveju grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema pateikiama:



1 pav. Grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [3]

1.1.2. Tiesioginio grįžtamojo ryšio valdymo sistema

Grįžtamojo ryšio valdymo sistemos pagrindinį trūkumą, jog regulatoriaus priimami sprendimai ir koreguojantys signalai formuojami yra tik atsiradus išėjimo pokyčiui, galima panaikinti, susiejus šią valdymo sistemos struktūrą su kita gerai žinoma – tiesioginio ryšio valdymo sistema [4]. Tiesioginio ryšio valdymo metodo pagrindinis privalumas yra tas, jog tokia sistema sugeba kompensuoti trikdantį poveikį λ prieš jam paveikiant proceso išėjimą x , o trūkumas – nematuojamas objekto išėjimas, dėl to valdymo sistemos reakcijai daug įtakos sudaro naudojamo proceso modelio tikslumas. Tad susiejant tiesioginio ir grįžtamojo ryšio reguliavimo principus, yra suprojektuojama efektyvi valdymo sistema, kuri geba panaikinti viena kitos trūkumus. Tokiose sistemose tiesioginio ryšio reguliavimas kompensuoja pagrindinius, greitai besikeičiančius trikdžius λ , o grįžtamojo ryšio kontūras – tiesioginio ryšio valdymo netikslumus ir nematuojamus poveikius.



2 pav. Tiesioginio grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [4]

Teoriškai norint panaikinti trikdžio λ poveikį proceso išėjimui x , kompensavimo grandis $W_k(s)$ gaunama iš tokios lygties:

$$W_k(s) = -\frac{W_\lambda(s)}{W_{pr}(s)}. \quad (1)$$

čia $W_\lambda(s)$ – trikdžio pardavimo funkcija;

$W_{pr}(s)$ – objekto perdavimo funkcija.

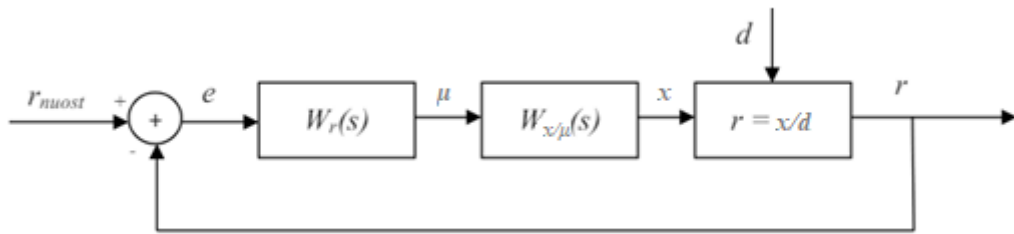
1.1.3. Santykio reguliavimo valdymo sistemos

Santykio reguliavimo valdymo sistemos, reiškia siekimas išlaikyti iš anksto nustatytą proporciją tarp dviejų procesų kintamųjų, dažniausiai srautų. Ši technika yra labai svarbi procesuose, kur cheminės ar fizinės savybės priklauso nuo teisingo sudedamųjų dalių ar komponentų santykio. O ją taikyti patogiausia yra tokiems technologiniams procesams, kur proceso išėjimo svyravimus sukeliančius vieno matuojamo nepriklausomo įėjimo pakitimus, galima kompensuoti kitu matuojamo ir manipuliuojamo įėjimo santykiniu pakitimu [5]. Tad santykio reguliavimo sistemos pagrindinė funkcija yra suvaldyti procesą, išlaikant iš anksto nustatytą santykį tarp reguliuojamo srauto x ir nereguliuojamo, tačiau matuojamo srauto d :

$$r = \frac{x}{d} \rightarrow r_{nuost}. \quad (2)$$

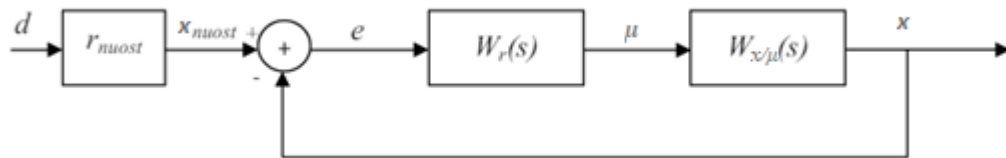
Santykio reguliavimo sistemos dažniausiai yra panašios į grįžtamojo ryšio valdymo sistemas dėl savo struktūros, tačiau jos turi ir savo išskirtinumų, kurie gali būti realizuoti valdymo scheme dviem būdais:

Pirmu metodu yra matuojami du srautai x ir d bei apskaičiuojamas jų santykis, kuris toliau, grįžtamojo ryšiu yra paduodamas sumavimo elementui su minuso ženklu, kad būtų apskaičiuojamas skirtumas e tarp nuostatos r_{nuost} ir esamo santykio r . Esama paklaidos vertė perduodama santykio reguliatoriui $W_r(s)$, jis manipuliuoja kintamojo x reikšme pagal gaunamus paklaidos signalus, kad būtų išlaikomas norimas santykis.



3 pav. Pirmą santykio reguliavimo sistemos schema [4]

Antrasis metodas apima nepriklausomo kintamojo d matavimą ir jo padauginimą iš santykio nuostato r_{nuost} , taip gaunamas reguliatoriaus nuostatas x_{nuost} .

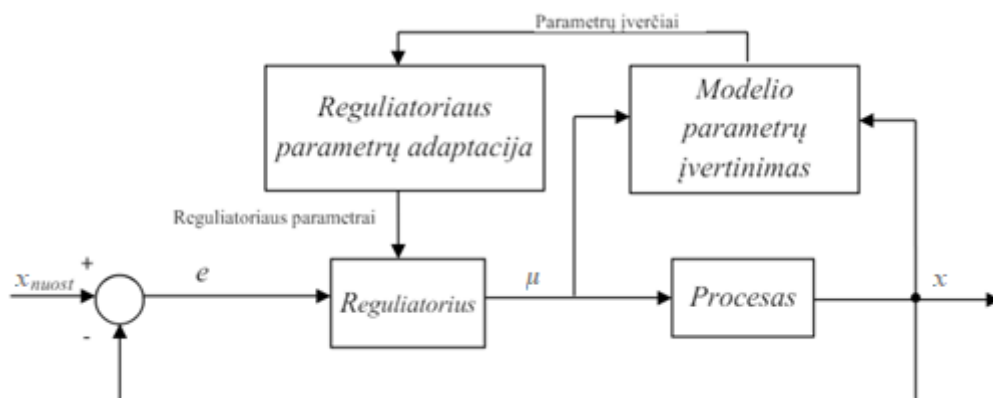


4 pav. Antrą santykio reguliavimo sistemos schema [4]

Antrojo tipo santykio reguliavimo sistemos struktūra yra naudojama dažniau, nes ją lengviau kurti ir derinti. Taip yra dėl to, kad pirmojoje struktūroje dinaminės sistemos charakteristikos nėra stacionarios, o tai blogina reguliavimo kokybę.

1.1.4. Adaptyvaus valdymo sistemos

Adaptyvios valdymo sistemos daugiausia yra naudojamos tokiuose technologiniuose procesuose, kur yra kintanti proceso dinamika ir įėjimo į sistemą signalai [6]. Adaptyvioje valdymo sistemoje, reguliatoriaus parametrai gali būti derinami pasirinktinai realiu laiku (angl. *on-line*) arba iš anksto nustatyta tvarka (angl. *off-line*), priklausomai nuo besikeičiančios proceso dinamikos ir trikdžių. Adaptyvių reguliatorių derinimas gali būti atliekamas tiesiogiai arba netiesiogiai. Reguliatoriui besiderinant tiesioginiu būdu, parametrai gaunami pagal informaciją gaunamą uždaro kontūro veikimo metu. Reguliatoriui besiderinant netiesiogiai, atliekamas proceso modelio parametrų įvertinimas ir pagal atnaujintą reguliuojamo proceso modelį, reguliatoriaus parametrai atnaujinami, pagal reguliatoriaus parametrų adaptacijos algoritmą. Proceso modeliu naudojimu dažniausiai yra paremta netiesioginė adaptacija.

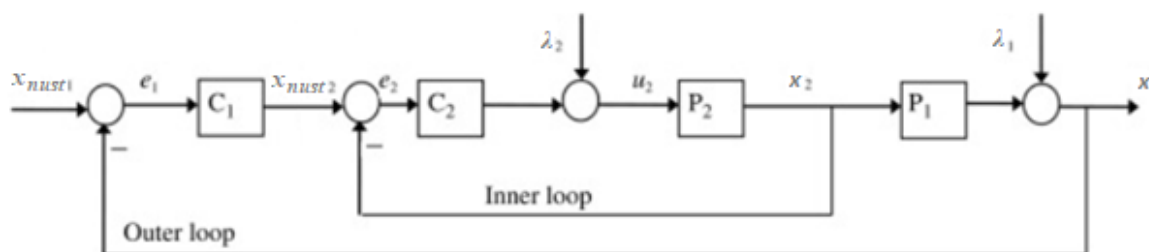


5 pav. Netiesioginės adaptyvaus valdymo sistemos struktūrinė schema [6]

Didžioji dalis adaptacijos algoritmų nuolatos yra aktyvūs, jog greitai užfiksuotų ir sureaguotų į nuostatos x_{nuost} pakitimą ar nuokrypio e pasikeitimą. Sureagavus į pokytį sistemoje, vertinami sistemos dinaminiai parametrai ir nustatomi perskaičiuoti regulatoriaus parametrai.

1.1.5. Pakopinės valdymo sistemos

Pakopinės valdymo sistemos pasižymi kelių kontūrų valdymo struktūra, naudojama valdyti technologiniams procesams, kuriuos veikia daugiau nei vienas trikdys ar sistemoje egzistuoja dideli vėlavimai, ir su vieno kontūro valdymo sistema nepasiakiamas norimas efektyvumas [7]. Dažniausiai taikant pakopines valdymo sistemas pakanka dviejų kontūrų, tai pagrindinio (išorinio) ir pavaldžiojo (vidinio). Dviejų kontūrų pakopinės valdymo sistemos struktūrinė schema:



6 pav. Pakopinės reguliavimo sistemos struktūrinė schema [7]

Pagrindinio kontūro regulatorius yra C_1 , jo išėjimas yra naudojamas kaip vidinio kontūro nuostatas x_{nust2} , dėl to pavaldžiojo kontūro regulatoriui C_2 , paklaida yra skaičiuojama remiantis išorinio kontūro regulatoriaus išėjimu. P_1 yra pagrindinė technologinio proceso perdavimo funkcija, o P_2 yra išsivesta dar viena papildoma perdavimo funkcija vidiniam kontūrai. x_1 ir x_2 yra pagrindinis ir antrinis valdomi išėjimai, e_1 ir e_2 yra pirminės ir antrinės valdymo klaidos, u_2 yra manipuluojamas kintamasis, gaunamas iš antrinio regulatoriaus išvesties, kuriam įtakos turi trikdžiai λ_1 , o taip pat ir λ_2 trikdžiai. Vidinis ir išorinis kontūrai yra suformuoti taip, jog kiekvienas yra su individualiu grįžtamuoju ryšiu. Pagrindinis pakopinės valdymo sistemos pranašumas yra tas, kad antriniame kontūre kylančius trikdžius ištaiso antrinis regulatorius, prieš paveikdamas pirminio kontūro valdomo išėjimo vertę. Pakopinė valdymo sistema užtikrina geresnį valdymo sistemos veikimą esant skirtingų tipų apkrovos trikdžiams. Pirminis regulatorius paprastai sureguliuojamas kaip valdiklis, turintis integruotąją dedamąją, nes jis yra atsakingas už valdymo tikslo pasiekimą. Antrinis regulatorius turi kuo greičiau kompensuoti apkrovos trikdžius, o greitam veikimui paprastai pakanka naudoti proporcinę dedamąją su dideliu stiprėjimu. Pirmiausiai yra reguliuojamas vidinio kontūro regulatorius, o pagrindinis regulatorius reguliuojamas tik vėliau ir jau su veikiančiu vidinio kontūro regulatoriumi.

1.2. Reguliatorių struktūros valdymo sistemose

Automatinėse valdymo sistemose su grįžtamuoju ryšiu dažniausiai yra naudojami regulatoriai susidedantys iš proporcingosios (P), integralinės (I) ir diferencialinės (D) dedamųjų. Šios dedamosios pasižymi skirtingais reagavimais į grįžtamojo ryšio signalo nuokrypį, o su jų skirtingomis kombinacijomis galima išgauti skirtingas algoritmų savybes [8]. Kokį algoritmą naudoti, priklauso nuo pačios valdymo sistemos dinamikos, tikslo ir stabilumo reikalavimų valdomam procesui, trikdžių pobūdžio bei kitų valdomo proceso dinaminių savybių.

Reguliatorių algoritmai gali būti išreikšti dviem būdais: absoliutinio poveikio forma ir pokyčio forma. Šie du išreiškimai skiriasi tuo, kaip jie nustato valdymo veiksnius regulatoriaus išėjime [9]. Absoliutinio algoritmo atveju, regulatoriaus išėjimas tiesiogiai nustato valdymo signalo vertę pagal valdomo dydžio nuokrypą. Naudojamas paprastiems ir tiesioginiams valdymo atvejams, tačiau gali būti jautrus triukšmui ir sukelti staigius sistemos pokyčius. Tuo tarpu, pokyčio algoritmo atveju, regulatoriaus išėjimas nustato pokytį valdymo signalo vertėje, todėl gaunamas regulatoriaus išėjimas yra korekcija prieš tai buvusiai išėjimo vertei. Pokyčio forma išreikštas regulatoriaus algoritmas naudojamas siekiant sumažinti triukšmo įtaką ir išvengti staigių sistemos pokyčių, tačiau reikalauja daugiau skaičiavimų ir duomenų apie ankstesnius valdymo veiksnius.

Taip pat reikia pabrėžti, jog šių dienų valdymo sistemose dominuoja valdymo algoritmų realizavimas valdikliuose, juose skaičiavimai atliekami diskretizuoto laiko intervaluose. Dėl to, šiame poskyryje yra analizuojami tik diskretiniai reguliatorių algoritmai.

1.2.1. P reguliavimo dėsnio algoritmas

Proporcingojo veikimo (P) reguliatorius yra paprasčiausios valdymo formos reguliatorius, nes jo veikimas pagrįstas tik klaidos dydžiu ir proporciniu stiprinimo koeficientu, dėl ko regulatoriaus išėjimas yra tiesiogiai proporcingas sistemos grįžtamojo ryšio signalo nuokrypiui [10]. Šio dėsnio reguliatorius užtikrina sistemos reakcijos greitaveiką į nuokrypius beveik visiems procesams, išskyrus integruojančius, kuriuose išlieka statinė paklaida.

P reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas absoliutinės paklaidos forma:

$$u_n = K_r * e_n; \quad (3)$$

čia n – duomenų numeris intervale;

K_r – stiprinimo koeficientas;

e – nuokrypis.

P reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas pokyčio poveikio forma:

$$\Delta u_n = K_r (e_n - e_{n-1}). \quad (4)$$

1.2.2. PI reguliavimo dėsnio algoritmas

Proporcingojo integralinio veikimo (PI) reguliatorius yra vienas iš populiariausių valdymo sistemų reguliatorių formų. Proporcinė dedamoji nustato, kiek stipriai regulatoriaus išėjimas reaguoja į nuokrypį, o integralinė dedamoji nustato, kaip greitai jis reaguoja į nuokrypių sumą bėgant laikui [11]. PI reguliatorius panaikina statinę paklaidą pereinamajame procese, tačiau gali sukelti sistemos svytavimus. Didinant regulatoriaus stiprinimą, taip pat didėja ir sistemos polinkis į nestabilumą, dėl integralinės dedamosios poveikio į nuokrypį.

PI reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas absoliutinio poveikio forma:

$$u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T}{T_i} \right) e_n + \frac{I_{n-1}}{T_i} \right]; \quad (5)$$

čia n – duomenų numeris intervale;

K_r – stiprinimo koeficientas;

T – diskretizavimo laikas;
 T_i – integravimo trukmė;
 e – nuokrypis;
 I – integruota klaidos reikšmė.

PI reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas pokyčio poveikio forma:

$$\Delta u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T}{T_i} \right) e_n - e_{n-1} \right]. \quad (6)$$

1.2.3. PD reguliavimo dėsnio algoritmas

Proporcingojo diferencialinio veikimo (PD) reguliatorius yra naudojamas rečiau, tačiau pasirenkamas tuose procesų valdymo sistemose, kur reikia greito sistemos atsako ir norima sumažinti greitus nuokrypių pokyčius [12]. Proporcinė dedamoji reaguoja į esamą nuokrypį, o diferencialinė – reaguoja į nuokrypio pokyčio greitį, taip sumažindama greitus nuokrypių pokyčius ir užtikrindama stabilesnę sistemos darbą. PD reguliatoriuje diferencialinė dedamoji turi paankstinantį ir stabilizuojantį efektą, tačiau šie reguliatoriai dažnu atveju palieka statinę paklaidą. Be to, diferencialinės dedamosios poveikis stiprina matavimo signalų triukšmą.

PD reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas absoliutinio poveikio forma:

$$u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} \right) e_n - \frac{T_d}{T} e_{n-1} \right]; \quad (7)$$

čia n – duomenų numeris intervale;

K_r – stiprinimo koeficientas;
 T_d – diferenciacijavimo trukmė;
 T – diskretizavimo laikas;
 e – nuokrypis.

PD reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas pokyčio poveikio forma:

$$\Delta u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} \right) e_n - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right]. \quad (8)$$

1.2.4. PID reguliavimo dėsnio algoritmas

PID reguliatorius yra kitas iš plačiau naudojamų reguliatorių formų, pasižymintis savo gebėjimu užtikrinti tikslų ir stabilų sistemų atsaką į nuokrypį [13]. Šio reguliatoriaus struktūra yra sudėtingiausia lyginant su kitais ankščiau aptartais reguliatoriais, dėl didesnio skaičiaus dedamųjų. Proporcinė dedamoji reaguoja į esamą nuokrypį, integralinė dedamoji nustato, kaip greitai reaguojama į nuokrypių sumą bėgant laikui, o diferencialinė – reaguoja į nuokrypio pokyčio greitį, taip sumažindama greitus nuokrypių pokyčius ir užtikrindama stabilesnę sistemos darbą. PID reguliatoriuje integralinė dedamoji pašalina statinę paklaidą, o diferencialinė dedamoji slopina dėl integralinės dedamosios poveikio padidėjusius svyravimus sistemoje.

PID reguliavimo dėsnio algoritmas išreikštas absoliutinio poveikio forma:

$$u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \frac{T_d}{T} e_{n-1} + \frac{T}{T_i} e_{n-1} \right]; \quad (9)$$

PID reguliavimo dėsnių algoritmas išreikštas pokyčio poveikio forma:

$$\Delta u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right]. \quad (10)$$

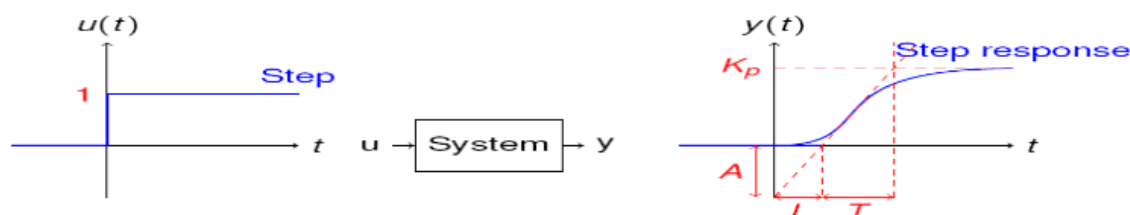
1.3. PID reguliatorių derinimo metodai

Nors ir PID reguliatoriai jau ilgą laiką yra plačiausiai ir dažniausiai naudojami reguliatorių tipai pramonėje, didelė dalis jų naudojami netinkamai suderinti [4]. Tai yra dėl to, nes reguliatorių derinimas yra sudėtingas procesas, reikalaujantis daug žinių, praktikos ir laiko, tad dažniausiai įmonė naudoja jau pačio gamintojo sureguliuotą PID reguliatorių, reguliuoto validacijos metu. Tam, kad būtų galima pasiekti didžiausią galimą valdymo sistemos efektyvumą ir kokybę yra naudojami įvairūs PID reguliatorių derinimo metodai.

1.3.1. Ziegler-Nichols metodas

Ziegleris ir Nicholsas 1942 metais pasiūlė du PID reguliatorių derinimo metodus, kurie buvo ir taip pat dar yra plačiai naudojami savo originalia ir modifikuotomis formomis [14].

Pirmasis Ziegler-Nichols metodas yra šuolinės reakcijos PID reguliatorių derinimo metodas. Šis metodas pramonėje yra kaip reguliatorių derinimo pagrindas. Šuolinės reakcijos metodas yra pagrįstas atvirojo kontūro žingsninio atsako proceso eksperimentu, todėl reikalaujama, kad procesas būtų stabilus. Proceso vienetinės šuolinės reakcijos atsakas apibūdinamas dviem parametrais L – vėlavimo laikas ir T – laiko pastovioji. Šie parametrai nustatomi nusibrėžus liestinę šalia proceso reakcijos kreivės taško, kur proceso atsako nuolydis yra didžiausias. 7 paveiksle yra pateikiama kaip nusibrėžti liestinę ir nusistatyti reikiamus parametrus L ir T iš proceso reakcijos į šuolį:



7 pav. Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu atliekamas proceso reakcijos tyrimas ir parametrų L bei T identifikavimas [14]

Identifikavus parametrus L ir T , toliau galima nusistatyti P, PI ir PID reguliatorių parametrus pagal 1 lentelėje pateiktas formules.

1 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu [14]

Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$		
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodas turi atskiras taisykles reguliatoriui derinti pirmos eilės su vėlavimu modeliui, kurios pateiktos 2 lentelėje.

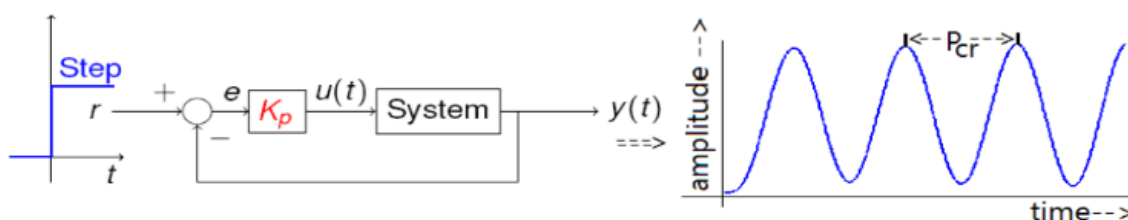
2 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų derinimo formulės pirmos eilės su vėlavimu modeliui pagal Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodą [4]

Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K_p L}$		
PI	$\frac{0,9T}{K_p L}$	$3,33L$	
PID	$\frac{1,2T}{K_p L}$	$2L$	$0.5L$

Antrasis Ziegler-Nichols metodas yra dažninės reakcijos metodas, kuris remiasi reikiamų parametrų, K_{cp} – ribiniu stiprinimo koeficientu ir P_{cr} – ribiniu periodu, identifikavimu iš proceso dažninės reakcijos.

K_{cp} ir P_{cr} parametrų identifikavimo procedūra:

1. parenkamas tik proporcinis valdymas;
2. proporcinio valdymo koeficientas yra didinamas tol kol pasiekiamas reakcijos nestabilumas, tai yra, kai yra pasiekiami nuolatiniai svyravimai, identifikuotas stiprinimas yra ribinis stiprino koeficientas;
3. ribinis periodas gaunamas – iš gautos nestabilios reakcijos išmatuojant svyravimo periodą.



8 pav. Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu atliekamas proceso reakcijos tyrimas ir parametrų K_{cp} bei P_{cr} identifikavimas [14]

Identifikavus parametrus K_{cp} ir P_{cr} , toliau galima nusistatyti P, PI ir PID reguliatorių parametrus pagal 3 lentelėje pateiktas formules.

3 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu [14]

Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cp}$		
PI	$0.45 K_{cp}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	
PID	$0.6 K_{cp}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

1.3.2. Cohen-Coon reguliatorių derinimo metodas

Kai jau reguliatorių derinimo sprendimo kūrimui buvo duotas tvirtas pagrindas Ziegler-Nichols pasiūlytais metodais, buvo sukurta daug jų modifikacijų, tačiau dauguma jų naudojo dvi tas pačias įvertintas dinamines charakteristikas kaip ir klasikiniai Ziegler-Nichols metodai [15]. Vienas iš pirmųjų sugalvotų reguliatorių derinimo metodų, kuriuo nustatant reguliatoriaus parametrus yra naudojamos 3 dinaminės charakteristikos buvo Cohen-Coon metodas, kuris papildė proceso dinamiką apibūdinančių dydžių vertes dar viena jų – stiprinimo koeficientu K_{pr} . Parametrai L ir T yra nustatomi kaip ir Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu aprašant 1.3.1. skyrelyje, o K_{pr} yra nustatomas iš tos pačios šuolinės reakcijos kreivės, tai yra nusistovėjusi reakcijos reikšmė. Šis metodas yra tinkamas naudoti pirmos eilės su dideliu vėlavimu sistemai.

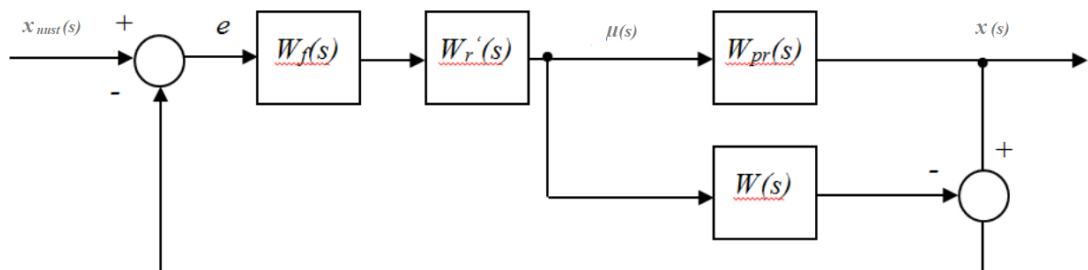
Turint nusistatatus L , T ir K_{pr} dinaminių charakteristikų vertes, galima jas statyti į Cohen-Coon metodu apibrėžtas reguliatorių parametrų nustatymo formules, pateiktas 4 lentelėje.

4 lentelė. P, PI, PD ir PID reguliatorių parametrų nustatymo formulės Cohen-Coon metodu [15]

Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K_{pr}L} \cdot (1 + \frac{L}{3 \cdot T})$		
PI	$\frac{T}{K_{pr}L} \cdot (0.91 + \frac{L}{12 \cdot T})$	$\frac{30 + 3 \cdot L/T}{9 + 20 \cdot L/T} \cdot L$	
PID	$\frac{T}{K_{pr}L} \cdot (1.33 + \frac{L}{4 \cdot T})$	$\frac{32 + 6 \cdot L/T}{13 + 8 \cdot L/T} \cdot L$	$\frac{4}{11 + 2 \cdot L/T} \cdot L$

1.3.3. Vidinio modelio valdymo (IMC) reguliatorių derinimo metodas

Vidinio modelio valdymo metodas yra naudojamas derinant reguliatorius sudėtingesnėse valdymo sistemose, kai procesą veikia trikdys [16]. IMC metodas remiasi idėja, kad reguliatorius turėtų naudoti išsamų sistemos modelį, jog pasiektų pageidaujamą atsaką, ir šis modelis būtų naudojamas sistemos dinamikai atkurti bei klaidoms koreguoti. Šiuo metodu suderintas PID reguliatorius siekia užtikrinti geriausią galimą atsaką į nuokrypį, išlaikant stabilumą ir minimalizuojant perreguliavimą.



9 pav. Pritaikytas vidinio modelio valdymas (IMC) grįžtamojo ryšio valdymo sistemoje modelis [16]

Vidinio modelio valdymo reguliatorius susideda iš: eksponentinio filtro $W_f(s)$, apytikslės modelio inversijos $W_r'(s)$ ir vidinio modelio $W(s)$. Eksponentinis filtras dažnai įtraukiamas į reguliatorius siekiant sumažinti triukšmą ir kitus nepageidaujamus signalus, kurie gali neigiamai paveikti sistemos veikimą. Šis filtras padeda sušvelninti greitus dinamikos svyravimus ir užtikrina, kad reguliatorius geriau reaguotų į lėtus, nuoseklius sistemos pokyčius, nesusitelkiant per daug į greitus ir atsitiktinius svyravimus.

$$W_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1}. \quad (11)$$

čia T_f – filtro laiko pastovioji.

Filtro laiko pastovioji yra derinamas parametras. Tinkamai pasirinkta filtro laiko pastovioji leidžia reguliatoriui pasiekti optimalų atsaką į nuokrypį, užtikrinant reikiamą dinamiškumą, tuo pačiu metu minimizuojant nepageidaujamą triukšmą ir perreguliavimą.

5 lentelė. PI ir PID reguliatorių parametų nustatymo formulės pirmos eilės su vėlavimu procesui vidinio modelio valdymo metodu [16]

Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d	T_f (visada $T_f > 0,2T$)
PI	$\frac{T}{K_{pr}T_f}$	T		$\frac{T_f}{L} > 1,7$
„patikslintas“ PI	$\frac{2T+L}{K_{pr}T_f}$	$T + \frac{L}{2}$		$\frac{T_f}{L} > 1,7$
PID	$\frac{2T+L}{2K_{pr}(T_f+L)}$	$T + \frac{L}{2}$	$\frac{TL}{2T+L}$	$\frac{T_f}{L} > 0,25$

1.3.4. Chien Hrones Reswick reguliatorių derinimo metodai

Dar vienas iš modifikuotų Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodo reguliatorių derinimo taisyklių, pristatė K. L. Chienas, J. A. Hronesas ir J. B. Reswickas [17]. Jie pristatė naują požiūrį, siūlydami kaip derinimo kriterijų pasirinkti „greičiausią reakciją be perreguliavimo“ – aperiodinę arba „greičiausią reakciją su 20 % perreguliavimu“. Šios taisyklės ne tik pagerino valdymo sistemų našumą, bet ir suteikė daugiau lankstumo, leidžiančio pasirinkti tinkamiausią reaktyvumo ir stabilumo balansą priklausomai nuo konkrečių sistemų poreikių. Dėl šių pakeitimų buvo galima pasiekti greitesnį sistemos atsaką, išlaikant jos stabilumą, kas yra ypač svarbu valdymo procesuose, reikalaujančiuose tikslumo ir greitos reakcijos.

6 lentelė. P, PI ir PID reguliatorių parametų nustatymo formulės Chien Hrones Reswick metodais [17]

Perreguliavimas	0 %			20 %		
Regulatoriaus tipas	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,95T}{K_{pr}L}$			$\frac{0,7T}{K_{pr}L}$		
PI	$\frac{0,95T}{K_{pr}L}$	$4L$		$\frac{0,7T}{K_{pr}L}$	$2,3L$	
PID	$\frac{0,95T}{K_{pr}L}$	$2,4L$	$0,42T$	$\frac{1,2T}{K_{pr}L}$	$2L$	$0,42T$

1.4. PID reguliatorių realizavimas pramoniniuose valdikliuose

PID reguliatoriai yra plačiai naudojami pramoniniuose valdikliuose, siekiant užtikrinti tikslią ir efektyvią procesų kontrolę. Šie reguliatoriai padeda stabilizuoti ir valdyti įvairius procesus, pradedant nuo paprastų temperatūros reguliatorių iki sudėtingų pramoninių automatizuotų valdymo sistemų. PID reguliatorių realizacija pramoniniuose valdikliuose yra įvairi, priklausomai nuo gamintojo. Šiame skyriuje aptariamos PID reguliatorių realizacijos trijų skirtingų gamintojų pramoniniuose valdikliuose: „Siemens“, „Schneider Electric“ ir „Allen-Bradley“. PID reguliatoriai pramoninių valdiklių programavimo paketuose pagrinde yra aprašomi funkciniuose blokuose.

1.4.1. PID reguliatorių realizavimas „Siemens“ valdikliuose

„Siemens“ pramoniniuose valdikliuose yra keletas tipų PID reguliatorių, kurie tarpusavyje gali skirtis savo algoritmais, labiau fokusuota savo panaudojimo sritimi bei galima konfigūruoti savo išvestimi. Šiame poskyryje yra apžvelgiami PID_Compact, PID_3Step ir PID_Temp reguliatoriai.

1.4.1.1. PID_Compact reguliatorius

PID_Compact – tai reguliatorius su tolydine arba impulsine išvestimi [18]. Reguliatorius turi rankinį ir automatinį režimą, taip pat turi automatinio parametrų derinimo funkciją. PID_Compact reguliatorius gali būti naudojamas ne tik vieno kontūro valdymo sistemose, bet ir sudėtingesnėse, tokiose kai sistema turi kelis reguliatorius veikiančius vieną vykdymo įtaisą. Pagrindė šis reguliatorius buvo sukurtas valdyti pavaroms. Reguliatoriaus įėjimai gali būti ribojami, o jo išėjimai skaliuojami.

Šis reguliatorius gali būti konfiguruojamas trimis skirtingomis išvestimis: tolydiniu signalu 0..10V arba 4..20mA, apdorojant išvesties signalą programoje, jei valdymo įtaisas turi netiesinę charakteristiką, arba diskretniais impulsais.

PID_Compact reguliatoriaus algoritmas [18]:

$$y = K_p \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]; \quad (12)$$

čia y – PID algoritmo išvestis;

K_p – proporcingumo koeficientas;

b – proporcinės dedamosios svorinis koeficientas;

w – nuostatas;

x – proceso vertė;

T_I – integravimo trukmė;

s – Laplaso operatorius;

T_D – diferencijavimo trukmė;

a – diferencialinės dedamosios vėlavimo koeficientas;

c – diferencialinės dedamosios svorinis koeficientas.

1.4.1.2. PID_3Step reguliatorius

PID_3Step yra žingsninis reguliatorius, sukurtas darbui su valdymo įtaisais, kurie turi integravimo savybę, kitaip tariant, kurie atmintyje kaupia ankstesnes būsenas [19]. Šis reguliatorius gali dirbti tik su vienu vykdyimo įtaisu, kitaip bus gaunamas prastas sistemos suvaldymas.

Konfigūruojant PID_3Step galima pasirinkti, kokia reguliatoriaus išvestis norima, analoginė ar skaitmeninė. Jei pasirenkama analoginė išvestis, yra generuojamas pasirenkamas išėjimo signalas 0..10V arba 4..20mA. Jei pasirenkama skaitmeninė išvestis, reguliatorius išduoda du skaitmeninius signalus, kurių išduos priklausys nuo nuokrypio ženklo.

„Siemens“ pramoniniuose valdikliuose, šis reguliatorius gali būti konfigūruojamas pasirinktinai kaip:

- trijų taškų žingsninis reguliatorius su padėties grįžtamuoju ryšiu,
- trijų taškų žingsnių reguliatorius be padėties grįžtamojo ryšio,
- vožtuvo reguliatorius su analogine išėjimo verte.

PID algoritmas pagal kurį yra realizuotas PID_3Step funkcinis blokas yra [19]:

$$y = K_p \cdot s \cdot \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]. \quad (13)$$

1.4.1.3. PID_Temp reguliatorius

PID_Temp – tai reguliatorius su tolydine arba impulsine išvestimi. Reguliatorius turi rankinį ir automatinį režimą, taip pat turi automatinio parametrų derinimo funkciją [18]. PID_Compact reguliatorius gali būti naudojamas ne tik vieno kontūro valdymo sistemose, bet ir sudėtingesnėse, tokiose kaip pakopinės. Šis reguliatorius yra specialiai sukurtas valdymo sistemoms, kur yra valdoma temperatūra, tačiau jį galima naudoti ir kitokiose valdymo sistemose, kur yra reguliuojama nebūtinai temperatūra. Reguliatoriaus įėjimai gali būti ribojami, o jo išėjimai skaliuojami.

Šis reguliatorius gali būti konfigūruojamas trimis skirtingomis išvestimis: tolydiniu signalu 0..10V arba 4..20mA, apdorojant išvesties signalą programoje, jei valdymo įtaisas turi netiesinę charakteristiką, arba diskretniais impulsais.

PID_Temp reguliatoriaus algoritmo formulė yra tokia pati kaip ir PID_Compact algoritmo formulės (14).

1.4.2. PID reguliatorių realizavimas „Schneider Electric“ valdikliuose

„Schneider Electric“ gamintojo valdikliuose yra daug skirtingų reguliatorių, tačiau šiame poskyryje aptariami: FB_PID ir PIDFF. Šių reguliatorių funkciniai blokai yra prieinami per „EcoStruxure Control Expert“ (anksčiau „Unity Pro“) programinį paketą.

1.4.2.1. FB_PID reguliatorius

FB_PID reguliatorius – yra vienas iš paprastesnių reguliatorių esamų „Schneider Electric“ valdikliuose. Jo funkcija leidžia įdiegti proporcinį, integralinį ir diferencialinį reguliavimą įvairiuose pramoniniuose procesuose [20]. Jo algoritmas yra aprašomas absoliutinės paklaidos forma. Reguliatoriaus išėjimas yra skaliuojamas. Šis reguliatorius neturi automatinio derinimo funkcijos.

PID algoritmo struktūra realizuota FB_PID funkciname bloke [20]:

$$u(i) = K_p * \left\{ s(i) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{j=1}^i s(j) + \frac{T_d}{T_s} [s(i) - s(i-1)] \right\}; \quad (14)$$

čia i – duomenų numeris intervale;

$u(i)$ – regulatoriaus išėjimas;

K_p – proporcingumo koeficientas;

$s(i)$ – proceso parametro nuokrypa nuo nuostatos;

T_s – Laiko diskretizavimo žingsnis;

T_I – integravimo trukmė;

T_D – diferencijavimo trukmė.

1.4.2.2. PIDFF reguliatorius

PIDFF regulatoriaus gali būti pasirenkamos struktūros: paralelinis arba maišytos struktūros [21]. Jo algoritmai yra aprašomi pokyčio poveikio forma. Regulatoriaus įėjimai gali būti ribojami, o jo išėjimai skaliuojami.

PID algoritmo struktūra realizuota PIDFF funkciname bloke:

$$y = K_p \cdot s \cdot b \left[1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{K_D \cdot s + 1} \right]; \quad (15)$$

1.4.3. PID reguliatorių realizavimas „Allen-Bradley“ valdikliuose

„Allen-Bradley“ valdikliuose nėra daug skirtingų PID reguliatorių tipų, lyginant su kitų gamintojų valdikliuose realizuojamais reguliatoriais. Šiame poskyryje yra apžvelgiami PID ir PIDE funkciniai reguliatorių blokai, kurie yra realizuoti „Allen-Bradley“ valdikliuose.

1.4.3.1. PID reguliatorius

PID funkcinis blokas – yra klasikinis PID reguliatorius realizuotas „Allen-Bradley“ valdikliuose, skirtas valdyti tokius dydžius kaip: srautą, slėgį, temperatūrą ar lygį. Funkcinis blokas yra pasiekiamas „RSlogix 5000“ ir „RSlogix 500“ programiniuose paketuose bei naujausioje programinio paketo versijoje „Studio 5000“ [22]. Jo algoritmo forma yra išreiškiama absoliutinio poveikio forma. Reguliatorius turi rankinį ir automatinį režimą bei automatinio derinimo funkciją. Regulatoriaus įėjimai gali būti ribojami, o jo išėjimai skaliuojami.

PID regulatoriaus algoritmo struktūra:

$$CV = K_p E + \sum K_I E \Delta t + K_D \frac{\Delta E}{\Delta t}; \quad (16)$$

čia CV – regulatoriaus išėjimas;

K_p – proporcingumo koeficientas;

E – nuokrypa;

K_I – Integralinė dedamoji;
 Δt – diskretizuotas laikas;
 K_D – diferencialinė dedamoji
 ΔE – nuokrypių skirtumas.

1.4.3.2. PIDE reguliatorius

Dauguma PID reguliatorių algoritmų yra išreiškiami absoliutinės paklaidos forma „Allen-Braldey“ valdikliuose, tačiau – PIDE funkciname bloke, PID reguliatoriaus algoritmas yra išreikštas pokyčio algoritmo forma [23]. PIDE funkcinis blokas yra praplėsta tradicinio PID funkcinio bloko versija, suteikiantis papildomas funkcijas ir lankstumo galimybes. PIDE funkcinis blokas yra pasiekiamas tik per „Studio 5000“ programinį paketą.

PIDE reguliatoriaus algoritmo struktūra:

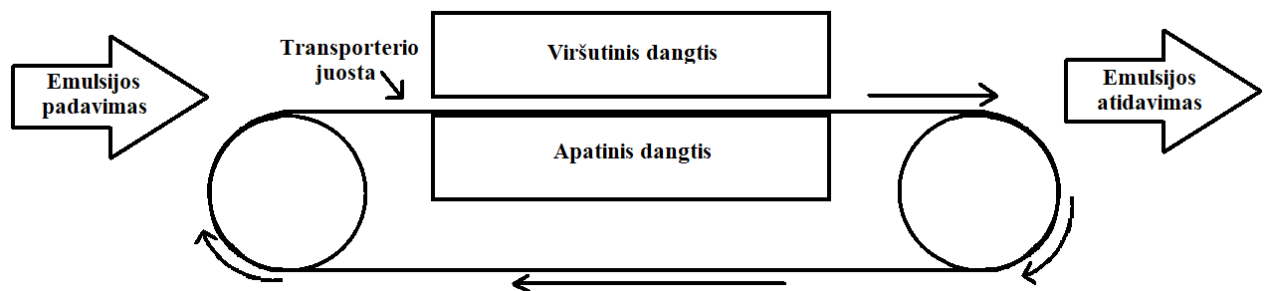
$$CV_n = CV_{n-1} + K_p \Delta E + K_I E \Delta t + K_D \frac{E_n - 2E_{n-1} + E_{n-2}}{\Delta t}; \quad (17)$$

PIDE privalumai:

- stabilumas: „*Anti-windup*“ ir diferencinio filtravimo funkcijos padeda išlaikyti sistemos stabilumą.
- adaptacija: „*Adaptive Gain*“ funkcija leidžia prisitaikyti prie besikeičiančių proceso sąlygų.
- valdymo metodai: galimybė pakeisti valdymą į pakopinį ar santykinį, suteikia daugiau valdymo strategijų galimybių.

2. Garo tunelio technologinės linijos valdymo sistemų tyrimas

Garų tunelis yra įrenginys skirtas emulsijai (košės pavidalo masei) kaitinti nuo $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+92\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros. Tunelis daugiausiai susideda iš dviejų garo dangčių (kamerų), tarp kurių nuolat sukasi juostinio transporterio juosta (10 paveikslas). Transporterio juosta yra gabenama emulsija kaitinimui, per visą garo tunelio ilgį. Šiluma į gaminį perduodama dviem būdais. Į viršutinį gaubtą tiekiamas garas kondensuojasi ant gaminio paviršiaus ir šildo emulsiją iš viršaus. Garas paduodamas į apatinį dangtį, esantį žemiau transporterio juostos, kondensuojasi ant juostos ir šildo emulsiją iš apačios, perduodant šilumą per transporterio juostą. Į apatinį dangtį yra prileidžiama vandens, siekiant sulaikyti į jį paduotą garą, kuris yra tiekiamas viso darbo metu, kadangi tiekiamu garu yra palaikoma nustatyta temperatūra apatiniame dangtyje. Viršutinis garo tunelio dangtis pagrįdė atliekų dvi funkcijas: paduoda pastovų garo srautą iš viršaus ant kaitinamos produkcijos ir užtikrina, jog garai teisingai judėtų tarp viršutinio dangčio ir emulsijos esančios ant transporterio. Viršutinis garo tunelio dangtis yra tarsi gaubtas, kuris nuleistas arti emulsijos ir apgaubia transporterio juostą iš viršaus.



10 pav. Garo tunelio principinė struktūrinė schema, su pažymėtais aktualiaisiais elementais tyrimui

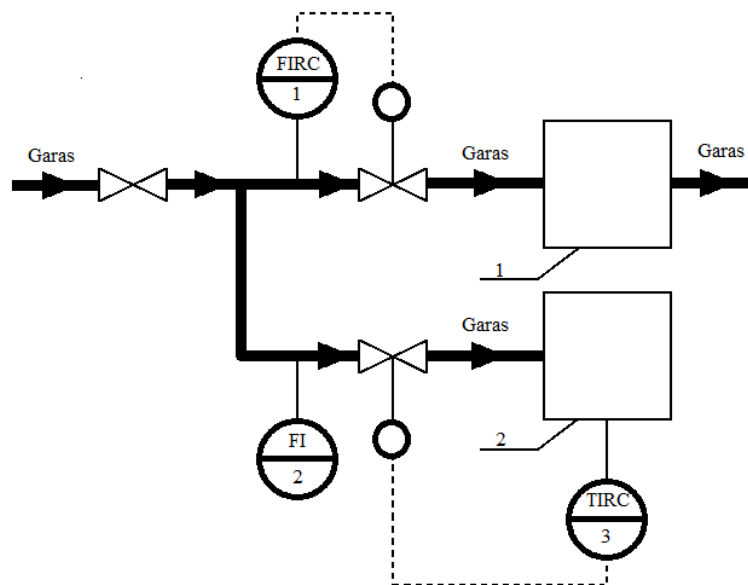
2.1. Garo tiekimas į viršutinį ir apatinį tunelio dangčius

Garų tiekimo tuneliui automatizavimo schema atvaizduota 11 paveiksle, garas yra paduodamas iš bendros fabriko garo sistemos pro garo slėgio redukcinių vožtuvų, kuris sumažina tiekiamo garo slėgį įrenginiui iš 5 – 7 barų į ~ 3 barus. Tuomet iš po redukcinio vožtuvo garas yra tiekiamas viršutiniam – 1 ir apatiniame – 2 garo tunelio dangčiams.

Į viršutinį dangtį 1 svarbu paduodamo garo srautą palaikyti pastovų, recepte užduotą reikšmę, kurioje šis dydis svyruoja 100 – 200 kg/h. Kad emulsijos kaitinimo procesas vyktų sklandžiai, tam yra naudojama srauto automatinio reguliavimo sistema, kuri naudoja PI reguliatorių valdyti viršutinio garo vožtuvo padėtį, pagal viršutinio debitomačio parodymus.

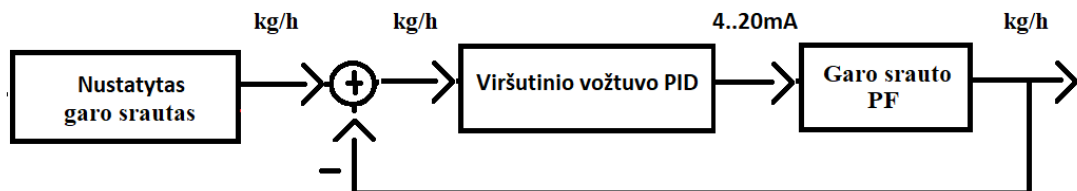
Iš viršutinio dangčio garas yra atiduodamas kaitinti emulsijai iš viršaus.

Apatiniam dangčiui 2 tiekiamo garo srautas yra matuojamas apatiniu debitomačiu, Apatinio dangčio 2 viduje yra svarbu palaikyti $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą, tam yra naudojama temperatūros automatinio reguliavimo sistema, kuri naudoja kitą PI reguliatorių valdyti apatinio garo vožtuvo padėtį, pagal apatiniame dangtyje matuojamą temperatūrą.



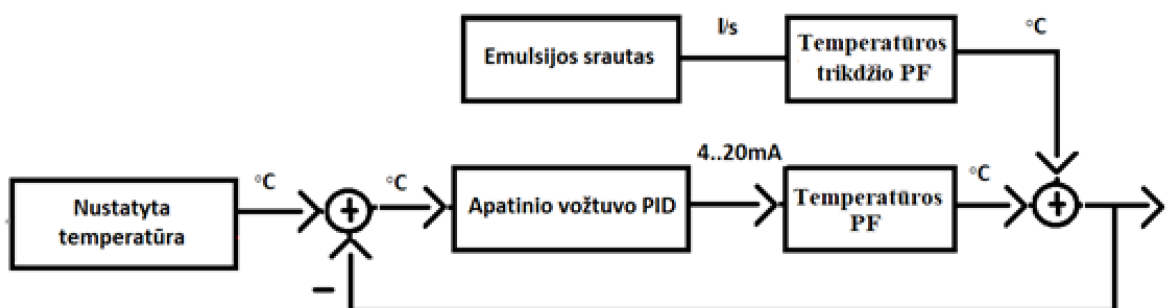
11 pav. Garo tiekimo garo tunelio dangčiams automatizavimo schema

Pagal išanalizuotą garo tiekimą ir jo srauto valdymą viršutiniam dangčiui, sudaryta esama viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto struktūrinė valdymo sistemos schema:



12 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto struktūrinė valdymo sistemos schema

Pagal išanalizuotą temperatūros palaikymo sistemą apatiniam dangčiui, sudaryta esama apatinio dangčio temperatūros struktūrinė valdymo sistemos schema:



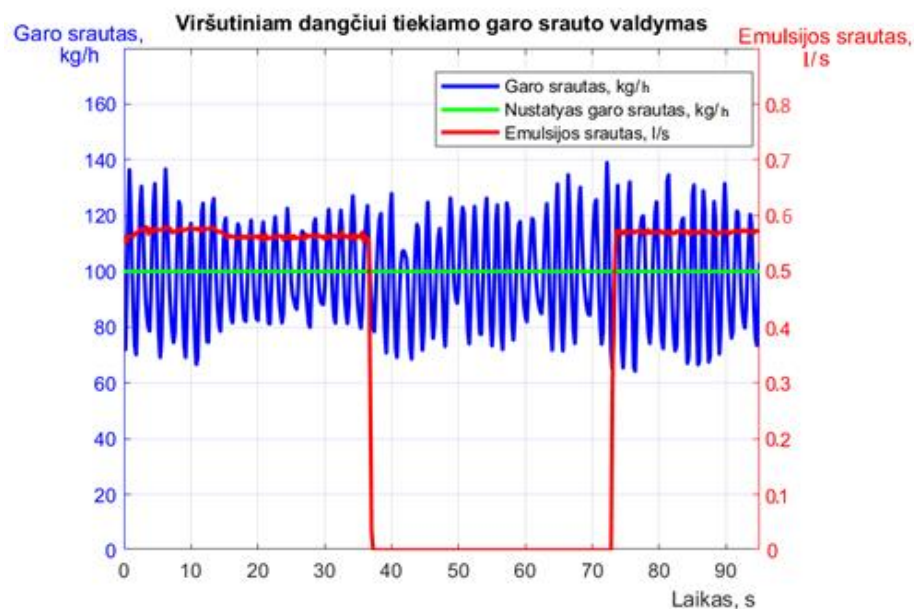
13 pav. Apatinio dangčio temperatūros struktūrinė valdymo sistemos schema

Iš 12 ir 13 paveiksluose pateiktų struktūrinių valdymo sistemų pastebima, jog dabartinės viršutiniam garo tunelio dangčiui tiekiamo garo srauto ir apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos yra grįžtamojo ryšio struktūros bei nustatyta, jog apatinio dangčio temperatūros valdymo sistema turi trikdančią poveikį.

2.2. Garo tunelio valdymo sistemų problematika

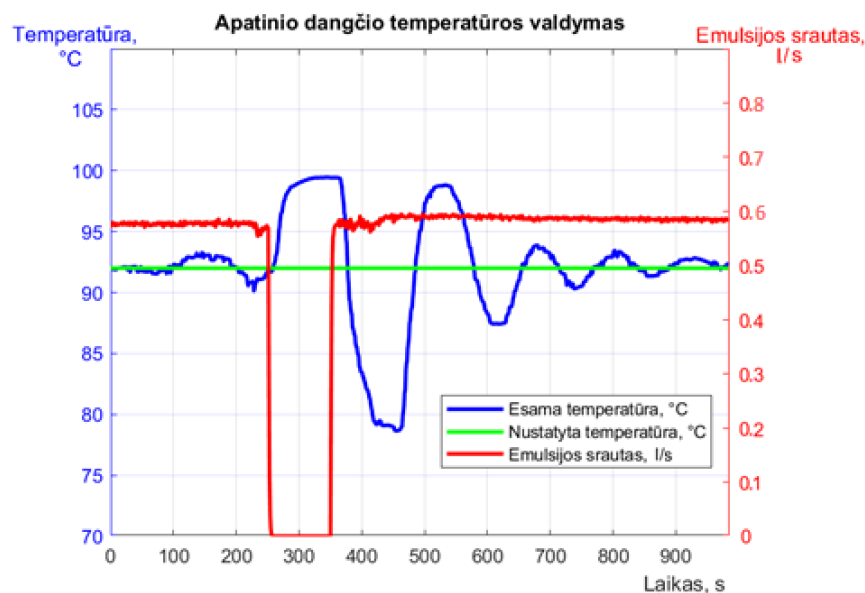
Garo tunelis turi dvi problemas susijusias su tiekiamo garo valdymo sistemų kokybe ir efektyvumu:

1. dirbant tuneliui gamybos režimu, garo kiekio padavimas į viršutinį dangtį nuolat svyruoja. Kaip pavyzdys, pagal receptą užduotas srautas yra 100 kg/h, tačiau momentinis garo srautas svyruoja pagrinde 70 – 130 kg/h, retkarčiais ir daugiau. Dėl to gali kisti produkto kokybė ar netinkamai į šilumą sureagavęs produktas gali net užkimšti įrenginį, kas reiškia broką ir prastovas, kadangi kaistanti emulsija plečiasi, o jai išsiplėtus daugiau nei numatyta, ji kemšasi garo tunelio gale, remdamasi į nusileidusį viršutinį garo tunelio dangtį;



14 pav. Tiekiamo garo palaikymas į viršutinį dangtį valdymas

2. pasibaigus produktui – kai ant juostinio transporterio, esančio tarp tunelio dangčių, nebelieka reikiamos kaitinti emulsijos, apatinio dangčio temperatūra kyla iki 100 °C, kai užduota 92 °C, nors ir apatinis garo vožtuvas pasiekia užsidarymo padėtį. Kai ant juostinio transporterio yra paleidžiamas naujas produktas, atsiranda dideli ir ilgi temperatūros svyravimai, temperatūra krenta iki 80 °C ir svyruoja kol nusistovi iki užduotos reikšmės. Kai produktas yra iškaitinamas apatinio dangčio temperatūrai esant mažiau 90 °C ar daugiau 94 °C traktuojama, jog jis yra rizikingas toliau būti perduoti gamybine linija. Šį sprendimą priima operatorius ar kokybės specialistas. Kaitinant emulsija didesne temperatūra nei užduota, šilumos perteklius taip pat gali paveikti emulsiją, vers ją išsiplėsti daugiau nei numatyta, kas gali užkimšti garo tunelį ir sustabdyti visą gamybinę liniją.

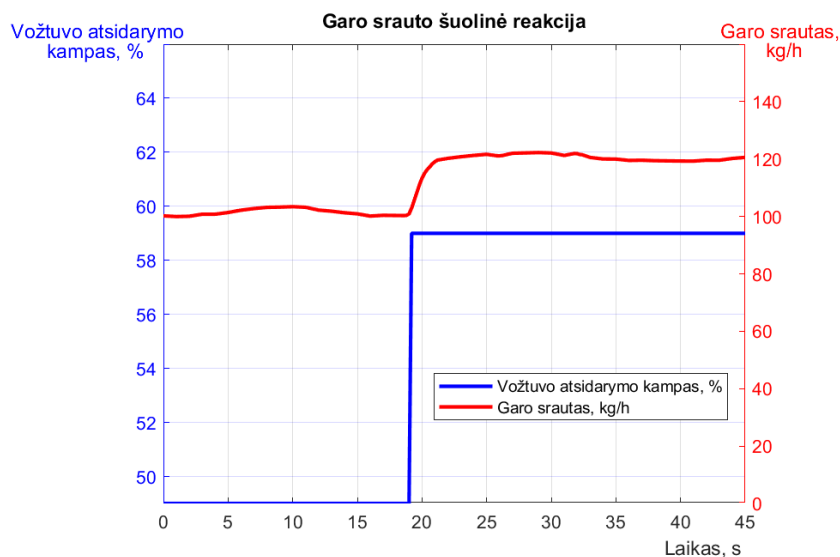


15 pav. Temperatūros palaikymo apatiniame dangtyje valdymas

2.3. Garo tunelio technologinės linijos valdymo objektų tyrimas

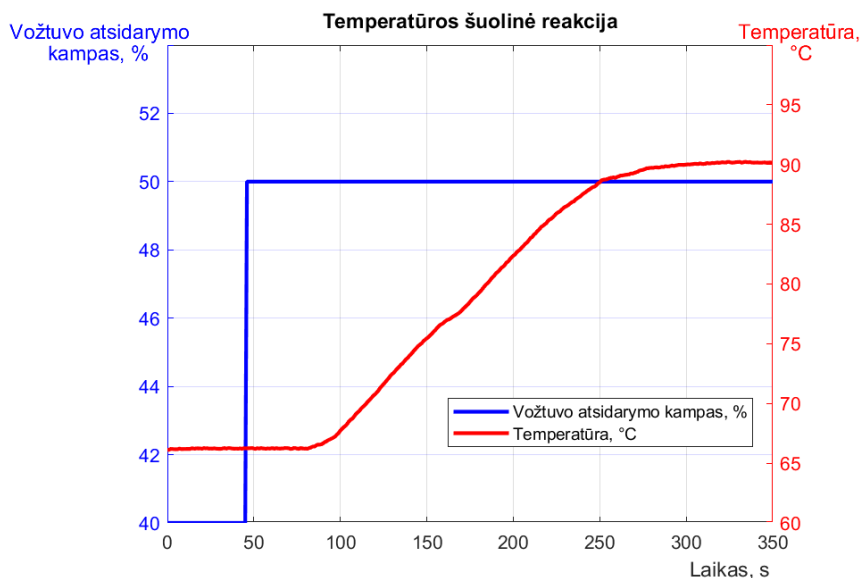
Norint identifikuoti tiriamose garo tunelio valdymo sistemose esančias valdymo objektų perdavimo funkcijas, atliekamos šuolinės reakcijos, paveikiant vykdymo įtaisus ir fiksuojant kaip tai įtakos reguliuojamą parametą. Viso atliekamas trijų perdavimo funkcijų identifikavimas: viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto, apatinio dangčio temperatūros ir apatinio dangčio temperatūros trikdžio.

Pirma buvo tiriamas viršutiniam garo tunelio dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo objektas, tam buvo pakeista į viršutinį garo tunelio dangtį tiekiančio garą reguliuojančio vožtuvo padėtis ir kas 200 ms fiksuojama kaip tai veikia tiekiamą garą viršutiniam dangčiui. Garo vožtuvo atsidarymo padėtis pakeista iš 49 % į 59 %. Eksperimento metu emulsija nėra tiekama į garo tunelį kaitinimui, o garo tunelio apatiniame dangčiui tiekiamą garą reguliuojančio vožtuvo atsidarymo padėtis nustatyta 40 %.



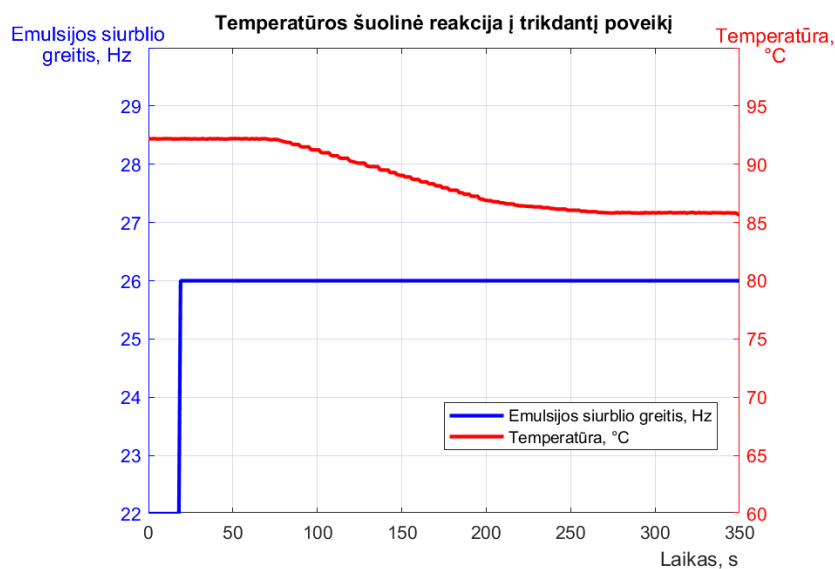
16 pav. Viršutinio dangčio garo srauto šuolinė reakcija

Antras eksperimentas atliktas apatinio garo tunelio dangčio temperatūros valdymo objektui, tam buvo pakeista į apatinį garo tunelio dangtį tiekiančio garo srautą reguliuojančio vožtuvo padėtis ir kas 1 s fiksuojama kaip tai veikia apatinio garo tunelio dangčio temperatūrą. Garo vožtuvo padėtis pakeista iš 40 % į 50 %. Eksperimento metu emulsija nėra tiekiamą į garo tunelį kaitinimui, o garo tunelio viršutiniai dangčiai tiekiamą garą reguliuojančio vožtuvo padėtis nustatyta 49 %.



17 pav. Apatinio dangčio temperatūros šuolinė reakcija

Trečias eksperimentas atliktas apatinio garo tunelio dangčio temperatūros trikdžio valdymo objektui. Paduodamos emulsijos kiekio nuostatas procese yra reguliuojamas rankiniu būdu, keičiant paduodamos emulsijos siurblio sukimosi greitį (kintamosios srovės dažnį). Paduodamos emulsijos elektrinio siurblio kintamos srovės dažnis pakeistas iš 22 Hz į 26 Hz ir kas 1 s fiksuojama, kaip tai veikia apatinio garo tunelio dangčio temperatūrą. Eksperimento metu garo tunelio apatiniame dangčiui tiekiančio garą reguliuojančio vožtuvo padėtis nustatyta 61 %, o garo tunelio viršutiniai dangčiai tiekiančio garą reguliuojančio vožtuvo padėtis nustatyta 49 %.



18 pav. Apatinio dangčio temperatūros šuolinė reakcija į trikdantį poveikį

2.4. Proceso perdavimo funkcijų identifikavimas

Siekiant identifikuoti objektų perdavimo funkcijas, eksperimentiškai atliktų šuolinių reakcijų duomenys yra įsistatomi į teoriškai apibrėžtas šuolinių reakcijų funkcijas [24].

Išnagrinėjus 16 paveiksle atvaizduotą garo srauto šuolinės reakcijos kreivę, pastebėta, jog joje dominuoja pirmos eilės su vėlavimu objekto dinamika, keičiant garą tiekiančio vožtuvo atsidarymo padėtį, kas reiškia, jog tiriamą garo srauto reakciją į kintančią vožtuvo atsidarymo padėtį yra tinkama aprašyti pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija:

$$W_{garo\ srauto} = \frac{K_{garo\ srauto}}{T_{garo\ srauto} * s + 1} * e^{-\tau_{garo\ srauto} * s}. \quad (18)$$

Dominuojanti antros eilės objekto dinamika su didžiuliu vėlavimu pastebima 17 paveiksle atvaizduotoje temperatūros šuolinės reakcijos kreivėje, keičiant garą apatiniam dangčiui tiekiančio vožtuvo atsidarymo padėtį, todėl nuspręsta temperatūros reakciją į kintančią vožtuvo atsidarymo padėtį aprašyti antros eilės su vėlavimu perdavimo funkcija:

$$W_{temperatūros} = \frac{K_{temp}}{(T_{temperatūros1} * s + 1)(T_{temperatūros2} * s + 1)} * e^{-\tau_{temperatūros} * s}. \quad (19)$$

Ryški antros eilės objekto dinamika su vėlavimu taip pat yra pastebima ir 18 paveiksle atvaizduotoje gautoje temperatūros trikdžio šuolinės reakcijos kreivėje, keičiant paduodamos emulsijos siurblio greitį, tad temperatūros reakcija į kintantį emulsijos siurblio greitį irgi aprašoma antros eilės su vėlavimu perdavimo funkcija:

$$W_{trikdžio} = \frac{K_{trikdžio}}{(T_{trikdžio1} * s + 1)(T_{trikdžio2} * s + 1)} * e^{-\tau_{trikdžio} * s}. \quad (20)$$

Perdavimo funkcijų stiprinimo koeficientus galima nustatyti pagal formulę:

$$K = \frac{y(\infty)}{\Delta U}. \quad (21)$$

Remiantis (21) formule, apskaičiuojami identifikuojamų perdavimo funkcijų stiprinimo koeficientai:

$$K_{garo\ srauto} = \frac{21,1045}{10} = 2,11045; \quad (22)$$

$$K_{temperatūros} = \frac{23,86}{10} = 2,386; \quad (23)$$

$$K_{trikdžio} = \frac{-6,5352}{4} = -1,6338. \quad (24)$$

Likusius perdavimo funkcijų parametrus tokius kaip laiko pastoviosios ir vėlinimo laikai nuspręsta rasti pasitelkiant skaitmeninį metodą, kuriuo yra siekiama, prigretinti identifikuojamas reakcijų kreives su eksperimentų metu gautais duomenų taškais. Metodas remiasi nuokrypių kvadratų sumų mažinimu [4].

$$S = \sum_{i=1}^n (y_e(t_i) - y(t_i))^2 \rightarrow \min. \quad (25)$$

Pirmos eilės su vėlavimu $W_{garo\ srauto}$ perdavimo funkcijos modelio sprendinio bendra forma yra:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } 0 \leq t < \tau \\ K \cdot (1 - e^{(-\frac{t-\tau}{T})}), & \text{kai } t \geq \tau \end{cases}. \quad (26)$$

Antros eilės su vėlavimu $W_{temperatūros}$ ir $W_{trikdžio}$ perdavimo funkcijų modelių sprendinių bendra forma yra:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } 0 \leq t < \tau \\ K \cdot (1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{(-\frac{t-\tau}{T_1})} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{(-\frac{t-\tau}{T_2})}), & \text{kai } t \geq \tau \end{cases}. \quad (27)$$

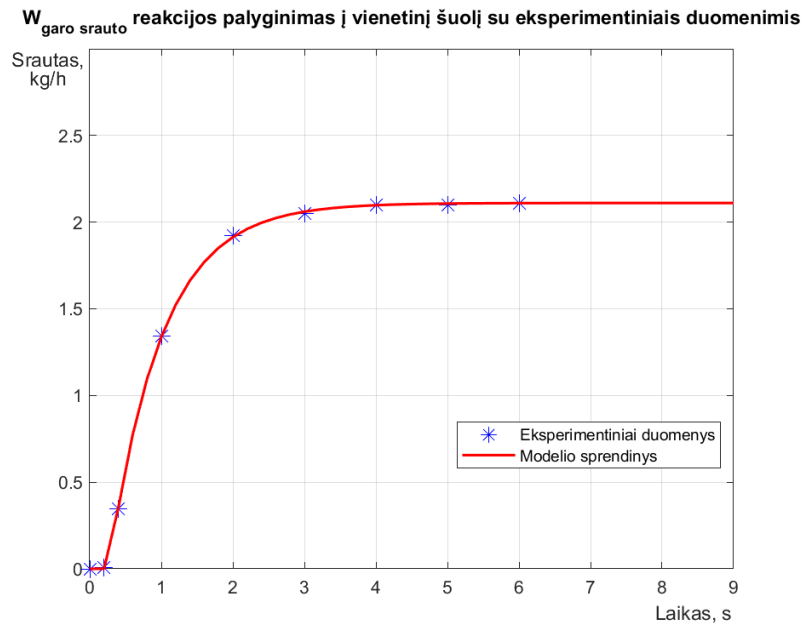
Skaitmeniniu metodu gaunamos tiriamų garo tunelio valdymo objektų perdavimo funkcijos (MATLAB kodas pateiktas priede Nr. 1):

$$W_{garo\ srauto} = \frac{2,11045}{0,726 * s + 1} * e^{-0,2632 * s}; \quad (28)$$

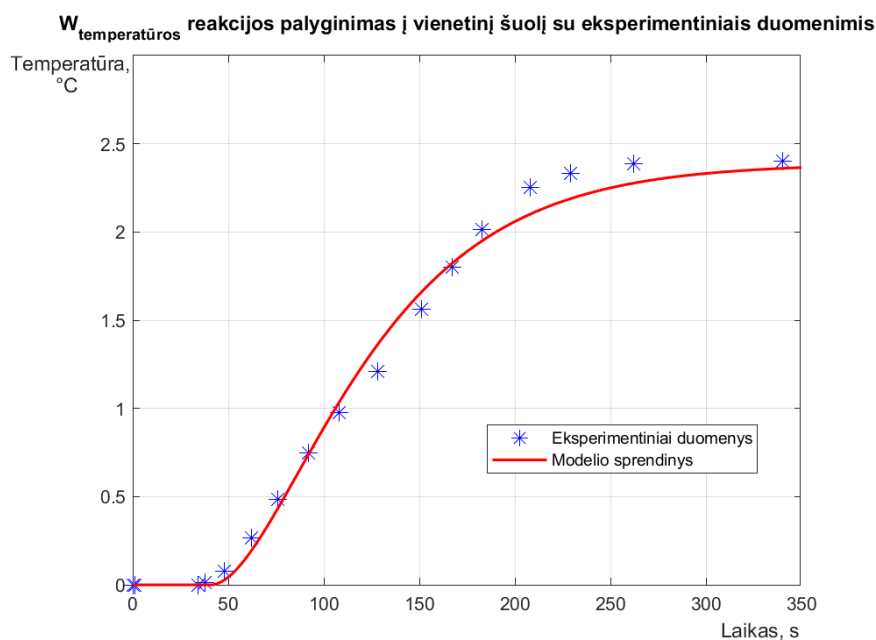
$$W_{temperatūros} = \frac{2,386}{(45,7057 * s + 1)(45,6497 * s + 1)} * e^{-40,6677 * s}; \quad (29)$$

$$W_{trikdžio} = -\frac{1,6338}{(43,5375 * s + 1)(43,5387 * s + 1)} * e^{-56,307 * s}. \quad (30)$$

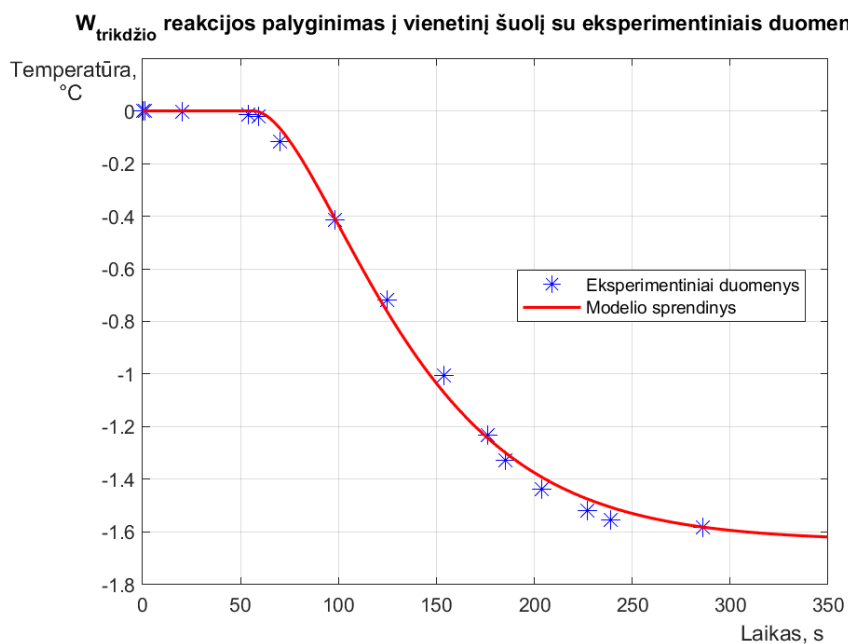
Pateikiamas identifikuotų reakcijų kreivių vienetinio šuolio palyginimas su eksperimentiniais šuolinių reakcijų duomenimis, tam, kad būtų įžvelgiama matematiškai identifikuotų valdymo objektų reakcijos atitiktis su realių objektų dinamika.



19 pav. $W_{garo\ srauto}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis



20 pav. $W_{\text{temperatūros}}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis



21 pav. $W_{\text{trikdžio}}$ reakcijos į vienetinį šuolį palyginimas su eksperimentiniais duomenimis

Iš 19 – 21 paveikslų matyti, jog identifikuotos valdymo objektų perdavimo funkcijos yra atitinkančios realių objektų dinamines charakteristikas, kadangi paveiksluose eksperimentų metu surinkti duomenys yra išsidėstę šalia identifikuotų objektų reakcijų kreivių į vienetinius šuolius.

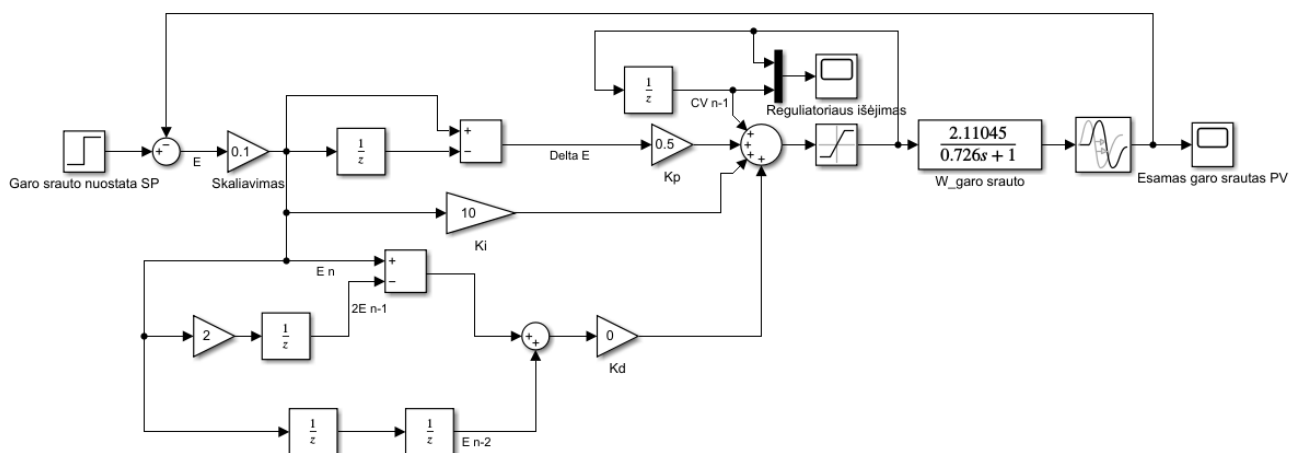
3. Garo tunelio valdymo sistemų modeliavimas

Pagal sudarytas viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto ir apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemų struktūrines schemas, aptartas 2.1. skyriuje bei analizuojant esamus valdymo sistemose naudojamus reguliatorius, realizuojami esami garo tunelio valdymo sistemų modeliai MATLAB/Simulink aplinkoje. Reguliatoriai yra suderinami PID reguliatorių derinimo metodais ir yra palyginamos gaunamos pereinamųjų procesų dinaminės charakteristikos su reakcijomis gaunamomis naudojant esamus reguliatorius. Esamoms valdymo sistemoms taikomos kitos reguliatorių struktūros, siekiant išgauti geresnes pereinamųjų procesų dinaminės charakteristikas.

3.1. Garo tunelio valdymo sistemų modeliai

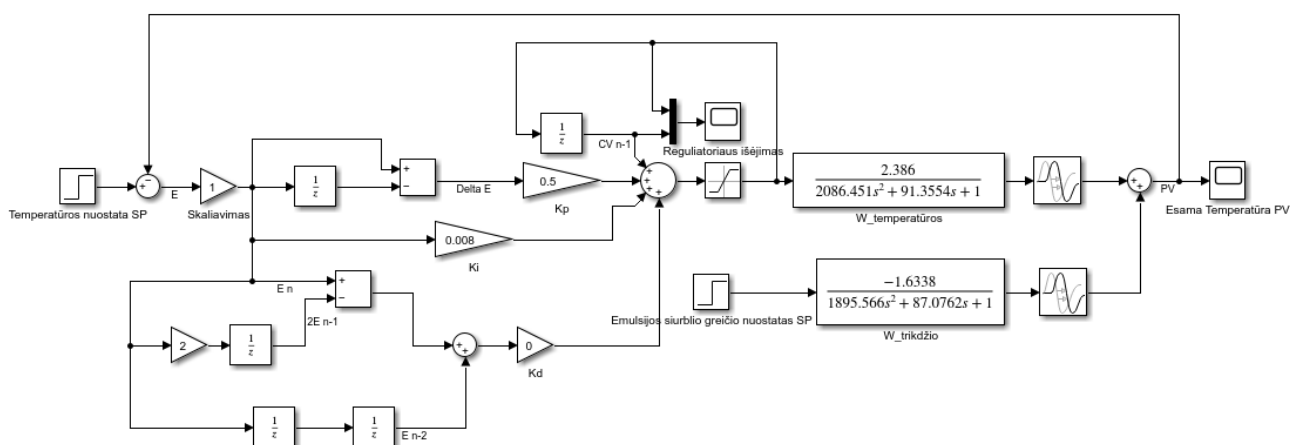
Valdymo sistemos yra modeliuojamos su šiuo metu valdymo sistemose naudojamais (17) pokyčio algoritmo forma išreikštais reguliatoriais, siekiant atkurti kuo panašesnes garo tunelyje esančias valdymo sistemas.

22 paveiksle pateikta sumodeliuota viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos modelis:



22 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos modelis

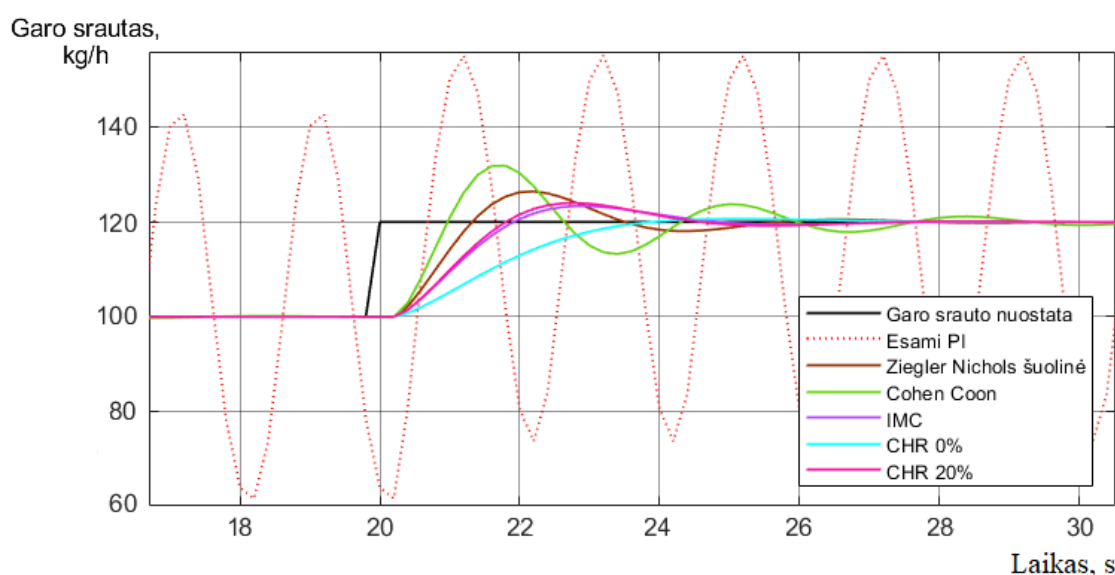
23 paveiksle pateikta sumodeliuota apatinio garo tunelio dangčio temperatūros valdymo sistemos modelis:



23 pav. Apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos modelis

3.2. Esamų valdymo sistemose naudojamų PI reguliatorių derinimas

Viršutiniam dangčiui svarbiausia yra išlaikyti užduotą tiekiamo garo srauto kiekį ir apamai jo neviršyti, kadangi svyravimai aplink nuostatą kenkia gaminamo produkto kokybei, o emulsijai sureagavus į didesnę paduodamą garo srautą nei numatytą pagal receptą, ji gali užkimšti garo tunelį ir sustabdyti visą procesą. Šiuo metu pastebėta, jog reguliatorius neišlaiko pastovaus paduodamo garo srauto ir yra pastebimi ryškūs švytavimai procese. Toliau įvertinus, jog identifikuota garo srauto perdavimo funkcija yra pirmos eilės su vėlavimu ir jos vėlinimo laiko santykis su laiko pastovia yra $\sim 0,3$, pasirinkta PI reguliatorių derinti pirmos eilės su vėlavimu modeliui transformuota Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos [3], Cohen-Coon, vidinio modelio valdymo (IMC), Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % ir su 20 % perreguliavimu reguliatorių derinimo metodais, siekiant rasti su kuriuo metodu suderintu PI reguliatoriaus parametrais yra atsikratoma švytavimų reakcijoje ir gaunamos geresnės pereinamojo proceso dinaminės charakteristikos. Svarbesnis kriterijus – yra reguliatorius sugebėjimas panaikinti perreguliavimą pereinamajame procese, reakcija laikoma nusistovėjusia, kai svyravimai neviršija ± 1 % nuostato.



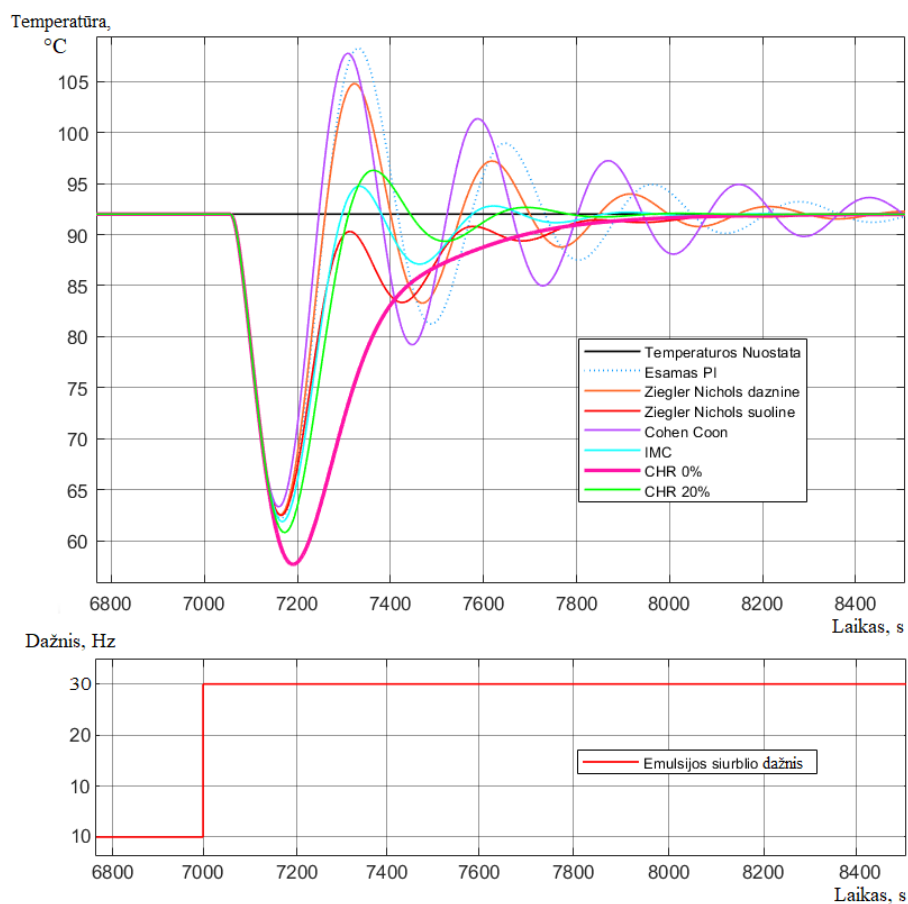
24 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės, reaguojant į šuolį, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius

Išanalizavus 24 paveiksle gautas procesų reakcijas į vienetinį šuolį, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus reguliatorius, pastebėta, jog visais metodais suderintus reguliatorių buvo panaikintas reakcijos švytavimas. Nustatyta, jog viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemoje naudojant PI reguliatorių, geriausia jį derinti Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % perreguliavimu metodu, kadangi naudojant šį reguliatorių, pereinamosios proceso reakcijos dinaminės charakteristikos į vienetinį šuolį yra gaunamos mažiausios, kas nusako aukštesnę valdymo sistemos kokybę. Šiuo metodu gaunamas pereinamojo proceso reakcijos perreguliavimas yra 0,583 %, nusistovėjimo laikas 2,897s, o statinė paklaida 0 kg/h.

7 lentelė. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos PI regulatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais

	$K_p = K_r$	$K_I = \frac{K_r}{T_i}$
Šiuo metu sistemoje naudojami parametrai	0,5	10
Ziegler – Nichols šuolinės reakcijos (formulės 3 lentelėje)	1,40728	1,69043
Cohen Coon (formulės 4 lentelėje)	1,46241	2,85027
IMC (formulės 5 lentelėje)	1,00031	1,055895
CHR 0 % (formulės 6 lentelėje)	0,54727	0,55281
CHR 20 % (formulės 6 lentelėje)	0,93819	1,1372

Apatiniame garo tunelio dangtyje svarbiausia yra palaikyti užduotą temperatūrą jo viduje ir jos neviršyti, o viena iš problemų su kuria susiduriama šiuo metu yra, jog procese atsiradus trikdžiams yra sukeliama ilgi temperatūros svyravimai, dėl ko dalis emulsijos gali būti neįkaitinta arba perkaitinta, tokiu atveju iškyla rizika toliau ją perduoti gamybine linija. Tad reikia sprendimo galinčio kuo greičiau svyravimus suvaldyti su kiek įmanoma mažesniu perreguliavimu ir maksimaliu dinamiu nuokrypiu. Perreguliavimai yra svarbiausias vertinimo kriterijus, temperatūros valdymo sistemoje, kadangi emulsijai sureagavus į didesnę temperatūrą nei numatytą pagal receptą, ji gali prasiplėsti daugiau nei numatyta, taip užkimšdama garo tunelio galą, remdamasi į nusileidusį viršutinį garo tunelio dangtį. Tam pirma reikia įvertinti, kaip tinkamai suderintas valdymo sistemoje naudojamas PI reguliatorius, suvaldys reakcija į trikdį. Įvertinus, jog identifikuota $W_{\text{temperatūros perdavimo funkcija}}$ yra antros eilės su vėlavimu ir jos vėlinimo laiko su laiko pastovia santykis yra $\sim 0,619$, pasirinkta PI reguliatorių derinti Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos, Ziegler-Nichols dažninės reakcijos [3], Cohen-Coon, vidinio modelio valdymo (IMC), Chien Hrones Reswick (CHR) su 0% ir su 20% perreguliavimu metodais. Siekiant rasti su kuriuo metodu suderintais PI regulatoriaus parametrais reguliatorius suvaldo valdymo sistemoje atsirandantį trikdį (emulsijos srautą), bus vertinama, pagal pereinamojo proceso dinamines charakteristikas, kurių siekiamą mažiausių, kas reikš geriausiai suvaldytą trikdį. Reakcija laikoma nusistovėjusia, kai svyravimai neviršija $\pm 1\%$ nuostato.



25 pav. Grafikas aukščiau – apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į šuolį proceso trikdį, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius. Grafikas žemiau – trikdžio šuolis procese

Vertinant apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos reakcijas į šuolį trikdį (25 paveikslas), naudojant skirtingais derinimo metodais derintus reguliatorius, yra lyginamos reakcijų dinaminės charakteristikos: perreguliavimas, statinė paklaida, maksimalus dinaminis nuokrypis ir nusistovėjimo laikas. Šuolinė reakcija nėra atliekama keičiant temperatūros nuostatą, kadangi visuose naudojamuose receptuose yra nustatoma viena ir ta pati temperatūra – 92 °C, kuri gamybos metu niekada nėra keičiama nuostate, todėl nuspręsta reguliatoriaus veiksmingumo nevertinti pagal pakitimą temperatūros nuostate, o apsiriboti tik atliekant šuolinę reakcija, pakeitus sistemą veikiančio trikdžio nuostatą. Problema iškelta apatinio garo tunelio dangtyje yra ryški ir su potencialia grėsme dėl galimų prastovų ar broko, dėl sukeliama didelių ir ilgų svyravimų, paveikiant procesą trikdžiu pasikeitimu. Išanalizavus 25 paveiksle pateiktas reakcijų kreives pastebėta, jog labiausiai tenkinančius išsikeltus kriterijus, pereinamojo proceso dinaminės charakteristikos yra gaunamos PI reguliatorių suderinus Chien Hrones Reswick (CHR) su 0% perreguliavimu metodu. Šiuo metodu suderinus PI reguliatorių, procese atsiradus trikdžiui išvengiama perreguliavimo ir statinės paklaidos, maksimalus dinaminis nuokrypis yra – 37,66 %, o reakcijos nusistovėjimo laikas yra gaunamas 793 sekundės.

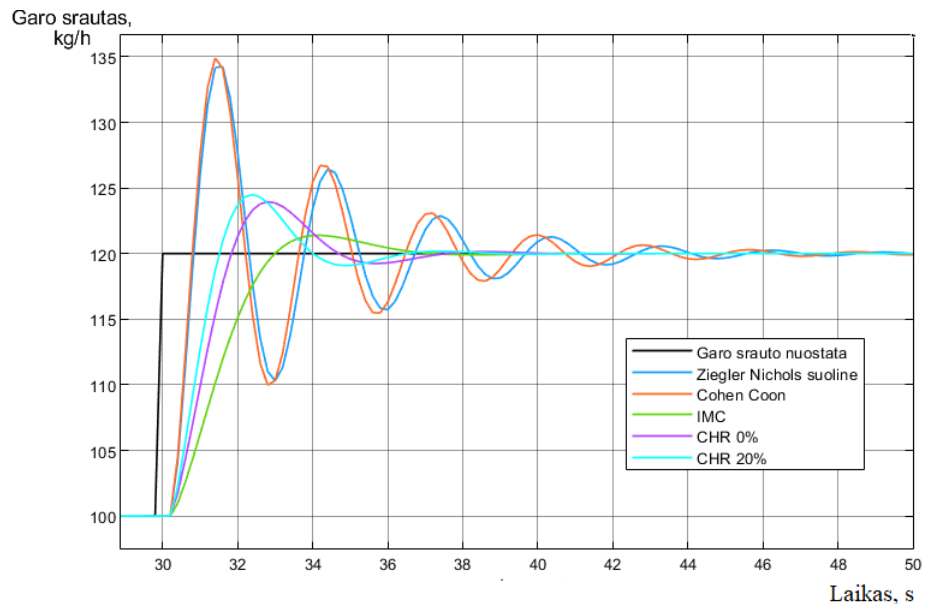
8 lentelė. Apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos PI reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais

	$K_p = K_r$	$K_I = \frac{K_r}{T_i}$
Šiuo metu sistemoje naudojami parametrai	0,5	0,008
Ziegler – Nichols šuolinės reakcijos (formulės 1 lentelėje)	0,609502	0,0034821
Ziegler – Nichols dažninės reakcijos (formulės 2 lentelėje)	0,558	0,0072585
Cohen Coon (formulės 4 lentelėje)	0,651201	0,0083134
IMC (formulės 5 lentelėje)	0,51792	0,0046568
CHR 0 % (formulės 6 lentelėje)	0,237029	0,0023256
CHR 20 % (formulės 6 lentelėje)	0,406335	0,004784

3.3. Esamoms valdymo sistemoms pritaikyti PID reguliatoriai

Esamoms analizuotoms tiekiamo garo srauto palaikymo viršutiniame dangčiui ir temperatūros palaikymo apatiniame dangtyje valdymo sistemoms, skirtingais reguliatorių derinimo metodais suderinti PID reguliatoriai, siekiant nustatyti ar išgaunami geresni procesų suvaldymai, reguliatoriams pridedant diferencialinę dedamąją. Pasirinkta tyrimą atlikti su PID reguliatoriumi, įvertinus realizacijos paprastumą, jei būtų nuspręsta jo struktūrą naudoti esamose valdymo sistemose, nes jose reguliatorių algoritmai yra realizuoti valdiklio funkciniuose blokuose.

Viršutinio garo tunelio dangčiui tiekiamo garo srauto palaikymo valdymo sistemos PID reguliatorių pasirinktą derinti tokiais pat metodais kaip ir 4.2. skyriuje derinant PI reguliatorių, tai pirmos eilės su vėlavimus modeliui transformuota Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos, Cohen-Coon, vidinio modelio valdymo (IMC), Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % ir su 20 % perreguliavimu metodais. Derinant reguliatorių skirtingais metodais, lyginama, kuriuo metodu suderintais PID reguliatoriaus parametrais yra gaunamos mažesnės pereinamojo proceso dinaminės charakteristikos, kas reiškia, jog valdymo sistema yra efektyvesnė.



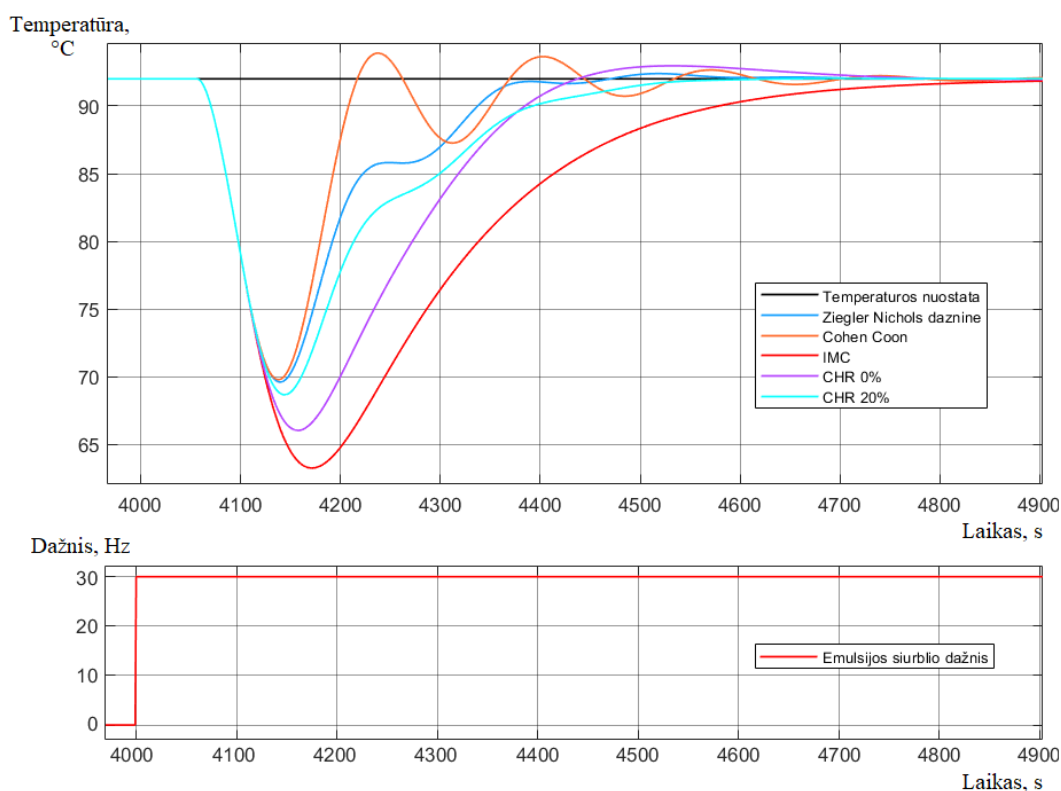
26 pav. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės, reaguojant į vienetinį šuolį nuostate, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius

Išanalizavus 26 paveiksle gautas procesų reakcijas į vienetinį šuolį, naudojant skirtingais derinimo metodais derintais PID reguliatoriais, pastebėta, jog geriausios dinaminės reakcijos charakteristikos kaip perreguliavimas, nusistovėjimo laikas ir statinė paklaida, gaunamos naudojant reguliatorių suderintą vidinio modelio (IMC) metodu. Šiuo metodu gaunamas reakcijos perreguliavimas yra 1,167 %, nusistovėjimo laikas – 2,397 sekundės, o statinė paklaida – 0 kg/h. Įvertinus, jog vienas iš svarbiausių kokybės vertinimo kriterijų – pereinamojo proceso perreguliavimas yra gaunamas didesnis nei su ankščiau valdymo sistemoje tirtu PI reguliatoriumi, derintu Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % perreguliavimu metodu, priimama, jog viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemoje geriausia yra naudoti esamą PI reguliatorių, jį suderinant Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % perreguliavimu metodu.

9 lentelė. Viršutiniam dangčiui tiekiamo garo srauto valdymo sistemos PID reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais

	$K_p = K_r$	$K_I = \frac{K_r}{T_i}$	$K_D = K_r \cdot T_d$
Ziegler – Nichols šulinės reakcijos (formulės 1 lentelėje)	1,87638	3,75276	0,23455
Cohen Coon (formulės 4 lentelėje)	2,19811	4,01017	0,18939
IMC (formulės 5 lentelėje)	0,64306	0,6769	0,06981
CHR 0 % (formulės 6 lentelėje)	0,93819	1,1372	0,387
CHR 20 % (formulės 6 lentelėje)	1,55889	1,39968	0,18317

Apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos PID reguliatorių pasirinktą derinti irgi tokiais pat metodais kaip ir 3.2. skyriuje pasirinktais derinti PI reguliatorių, siekiant rasti su kuriuo metodu suderintais PID reguliatoriaus parametrais yra gaunamos labiausiai išsikeltus kriterijus praeitame poskyryje, atspindinčias pereinamojo proceso dinamines charakteristikas, kai yra atliekamas vienetinis šuolis trikdyme, pakeičiant siurblio skirto paduoti emulsijai srovės dažnį. Šuolinė reakcija nėra atliekama keičiant temperatūros nuostatą, taip pat kaip ir vertinant ankstesniame poskyryje analizuotas pereinamųjų procesų reakcijas temperatūros palaikymo sistemoje, naudojant PI reguliatorių, derintą skirtingais metodais, kadangi visuose naudojamuose receptuose yra nustatoma viena ir ta pati temperatūra, 92 °C, kuri gamybos metu niekada nėra keičiama nuostate, todėl nuspręsta reguliatoriaus veiksmingumo nevertinti pagal pakitimą temperatūros nuostate, o apsiriboti tik atliekant šuolinę reakcija, pakeitus sistemą veikiančio trikdžio nuostatą.



27 pav. Viršuje – apatinio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostate ir proceso trikdyme, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas

Išanalizavus 27 paveiksle pateiktas apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos reakcijas į šuolį trikdyme, naudojant skirtingais derinimo metodais derintais reguliatoriais, pastebėta, jog geriausiai suvaldoma reakcija į vienetinį šuolį trikdyme naudojant PID reguliatorių yra gaunama, reguliatorių suderinus Chien Hrones Reswick (CHR) su 20 % metodu. Šiuo metodu suderinus PID reguliatorių, procese atsiradus trikdžiui išvengiama perreguliavimo ir statinės paklaidos, maksimalus dinaminis nuokrypis yra – 25 %, o reakcijos nusistovėjimo laikas yra gaunamas 464 sekundės. Atlikus šį tyrimą, pastebėta, jog apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos kokybei pagerinti, galima joje naudojant PID reguliatorių suderintą Chien Hrones Reswick (CHR) su 20 % metodu, nei bandant naudoti suderintą esamą PI reguliatorių.

10 lentelė. Apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos PID reguliatoriaus parametrai gauti suderinus jį skirtingais reguliatorių derinimo metodais

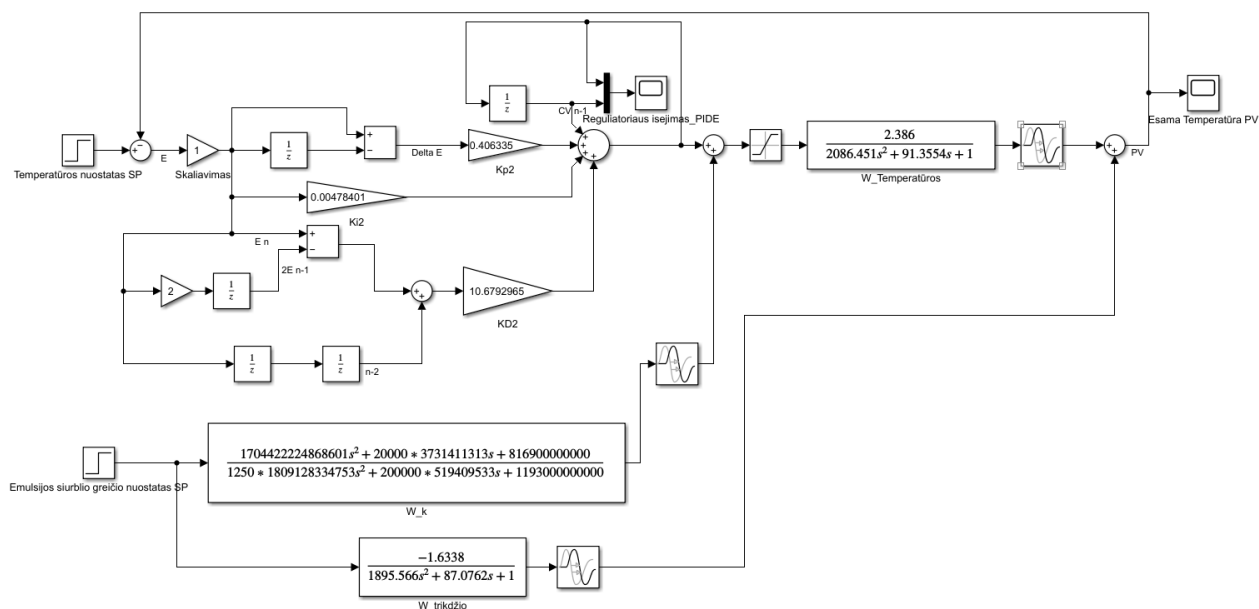
	$K_p = K_r$	$K_I = \frac{K_r}{T_i}$	$K_D = K_r \cdot T_d$
Ziegler – Nichols dažninės reakcijos (formulės 2 lentelėje)	0,744	0,0072585	18,78716
Cohen Coon (formulės 4 lentelėje)	1,00549	0,009615	17,18096
IMC (formulės 5 lentelėje)	0,32696	0,0029381	6,56251
CHR 0 % (formulės 6 lentelėje)	0,40634	0,004784	10,6793
CHR 20 % (formulės 6 lentelėje)	0,64336	0,0056109	15,89436

3.4. Valdymo sistemos struktūros keitimas

Pagal atliktus ankstesnius tyrimus nustatyta, jog viršutinio dangčio garo srauto valdymo sistemos esama grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūra yra tinkama naudoti, kadangi joje tinkamai suderinus reguliatorių yra panaikinamas švytavimas pereinamajame procese, o perreguliavimas neviršija 1 %. O tuo tarpu, nors ir apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemoje yra pasiektas geresnis trikdžio sukeltos įtakos suvaldymas dangčio temperatūrai, panaudojant PID reguliatoriaus struktūra esamoje grįžtamojo ryšio struktūros temperatūros valdymo sistemoje, didelis temperatūros kritimas atsiradus trikdžiui procese išlieka, todėl nuspręsta tobulinti esamą temperatūros valdymo sistemą, jos struktūroje pridėdant trikdžio kompensavimo grandį. Tuo siekiama panaikinti trikdžio įtaką, jį numatant, prieš paveikiant valdomą dydį. Tad turimai valdymo sistemai pridėdamos tiesioginio ryšio kompensavimo grandis, prijungiant ją prie reguliatoriaus išėjimo, kuris įvardintų kaip trikdys įtakos valdomą kintamąjį ir pagal kokią lygtį jį kompensuotų. Tiesioginio ryšio kompensatoriaus perdavimo funkcija yra apskaičiuojama pagal (1) formulę, į ją įsistačius antrame skyriuje identifikuotas $W_{\text{temperatūros}}$ (29) ir $W_{\text{trikdžio}}$ (30) perdavimo funkcijas:

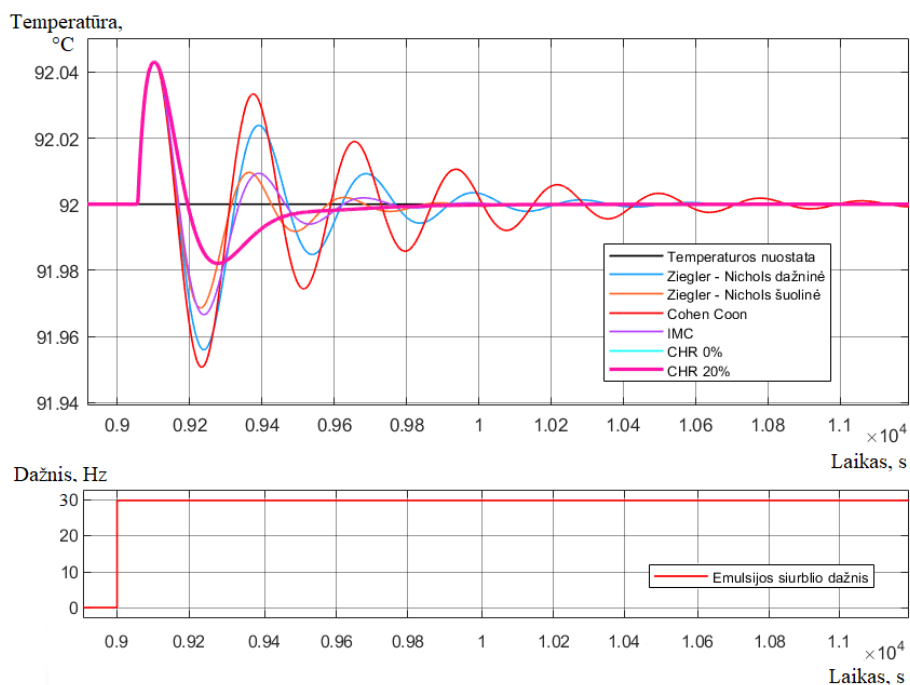
$$\begin{aligned}
 W_k(s) &= -\frac{W_{\text{trikdžio}}(s)}{W_{\text{temperatūros}}(s)} = -\left(\frac{\frac{1,6338}{(43,5375 * s + 1)(43,5387 * s + 1)} * e^{-56,307 * s}}{\frac{2,386}{(45,7057 * s + 1)(45,6497 * s + 1)} * e^{-40,6677 * s}} \right) = \\
 &= \frac{1704422224868601 * s^2 + 20000 * 3731411313 * s + 816900000000}{1250 * 1809128334753 * s^2 + 200000 * 519409533 * s + 1193000000000} * e^{-15,6393 * s}. \quad (31)
 \end{aligned}$$

Gautą kompensatoriaus perdavimo funkciją priskiriama apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemoje, kompensatoriaus išėjimą prijungiant į reguliatoriaus išėjimą, taip sukuriant tiesioginį ryšį tarp valdymo sistemoje esančių kontūrų, trikdžio kontūro ir garo vožtuvo atidarymo kontūro, veikiančių temperatūrą apatiniame garo tunelio dangtyje.



28 pav. Modifikuotas apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemos modelis, įvertinus ryšius tarp valdymo sistemos kontūrų, papildant esamą sistemos struktūrą trikdžio kompensavimo grandimi

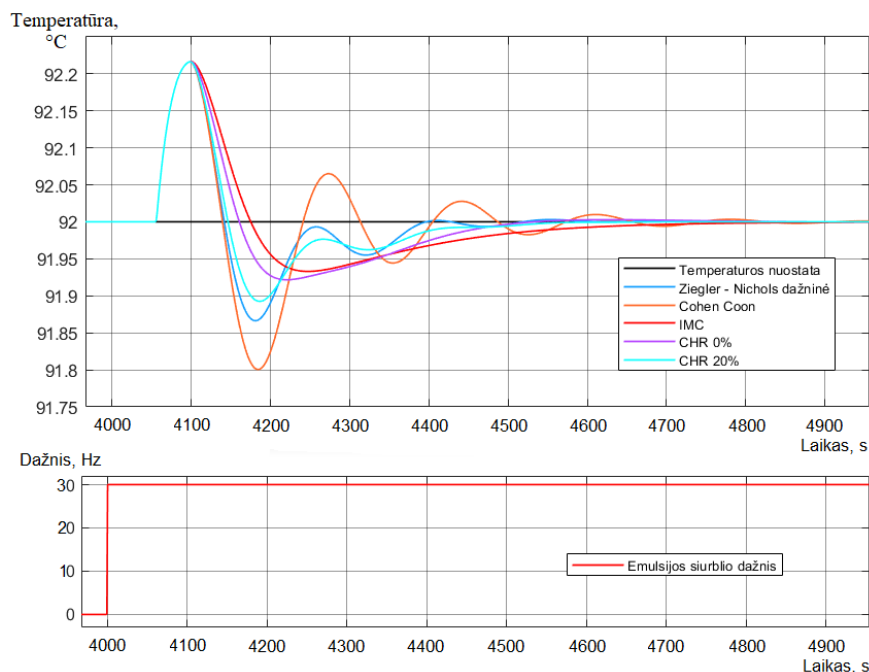
Nustatyti modifikuotos valdymo sistemos pasiteisinimą, pasirinkta atlikti tyrimą, atlaikant šuolinę trikdžio reakciją, fiksuojant jo įtaką temperatūros pokyčiui, naudojant skirtingais reguliatorių derinimo metodais suderintus PI ir PID reguliatorius lyginant tokiais pat kriterijais, kaip ir 4.3. poskyryje.



29 pav. Viršuje – modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostatoje ir proceso trikdyje, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PI reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas

Išanalizavus 29 paveiksle pateiktas modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos reakcijas į šuolį trikdyme, naudojant skirtingais derinimo metodais derintais PI reguliatoriais, pastebėta, jog naudojant bet kuriuo derinimo metodu suderintą reguliatorių,

kartu esamą valdymo sistemą papildant kompensavimo funkcija, yra beveik visiškai kompensuojamas trikdys procese, jo įtaką temperatūrai yra numatoma dar prieš ją paveikiant, tai pastebima dėl smarkiai sumažėjusio pereinamojo proceso maksimalaus dinaminio nuokrypio, o apamai svyravimai aplink nuostatą yra mažesni nei 1 %, kas anksčiau priima, jog reakcija traktuojama nusistovėjusia. Nors ir su nedideliu pranašumu, tačiau renkant optimalią valdymo sistemos reakciją į trikdį, temperatūros valdymo sistemoj su trikdžio kompensavimo grandimi, naudojant PI reguliatorių, geriausia ją rinktis derinti Chien Hrones Reswick (CHR) su 20 % metodu, dėl mažiausio gaunamo maksimalaus dinaminio nuokrypio, kuris lygus 0,07337.



30 pav. Viršuje – modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos pereinamųjų procesų reakcijų kreivės į vienetinį šuolį temperatūros nuostatoje ir proceso trikdyje, naudojant skirtingais derinimo metodais derintus PID reguliatorius, apačioje – proceso trikdžio nuostatas

Išanalizavus 30 paveiksle pateiktas modifikuotos apatinio garo tunelio dangčio temperatūros palaikymo valdymo sistemos reakcijas į šuolį trikdyje, naudojant skirtingais derinimo metodais derintais PID reguliatoriais, pastebėta, jog naudojant bet kuriuo derinimo metodu suderintą PID reguliatorių, taip pat kaip ir PI, kartu esamą valdymo sistemą papildant kompensavimo funkcija, yra beveik visiškai kompensuojamas trikdys procese, jo įtaką temperatūrai yra numatoma dar prieš ją paveikiant, kadangi svyravimai aplink nuostatą yra mažesni nei 1 %, kas anksčiau priima, jog reakcija traktuojama nusistovėjusia. Nors ir su nedideliu pranašumu, tačiau renkant optimalią valdymo sistemos reakciją į trikdį iš 30 paveikslas, temperatūros valdymo sistemoj su trikdžio kompensavimo grandimi, naudojant PID reguliatorių, geriausia ją rinktis derinti Chien Hrones Reswick (CHR) su 20 % metodu, dėl mažiausio gaunamo maksimalaus dinaminio nuokrypio. Matyti, jog modifikuotoje valdymo sistemai naudojant PID reguliatorių, visų pereinamųjų procesų reakcijų perreguliavimas yra apie 0,217 %, o tuo tarpu su PI (29 paveikslas) – 0,0454 % kas reiškia, jog didesnė valdymo sistemos kokybė yra išgaunama modifikuotoje apatinio dangčio temperatūros valdymo sistemoje, naudojant PI reguliatorių.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, aptartos skirtingos automatinių valdymo sistemų struktūros, skirtingos reguliatorių struktūros, skirtingi reguliatorių derinimo metodai ir PID reguliatorių realizaciją skirtingų gamintojų pramoniniuose valdikliuose.
2. Išanalizavus garo tunelio technologinę liniją, nustatyta, jog emulsijos kaitinimo garu procese technologiniame procese dalyvauja dvi valdymo sistemos: viršutinio dangčio garo srauto ir apatinio dangčio temperatūros. Pastebėta, jog abi valdymo sistemos naudoja grįžtamojo ryšio struktūrą ir PI reguliatorių. Surinkti eksperimentiniai šuolinių reakcijų duomenys, iš kurių identifikuotos valdymo objektų perdavimo funkcijos.
3. Atlikus garo srauto valdymo sistemos kokybės vertinimo tyrimą, nustatyta, jog esama valdymo sistemos struktūra yra tinkama garo srautui valdyti, o efektyviausia joje naudoti yra PI reguliatorių, suderintą Chien Hrones Reswick (CHR) su 0 % perreguliavimu metodu. Šiuo metodu gauti reguliatoriaus parametrai: $K_p = 0,54727$, $K_I = 0,55281$, o gaunamos pereinamojo proceso dinaminės charakteristikos: perreguliavimas – 0,583 %, nusistovėjimo laikas – 2,897s, statinė paklaida – 0 kg/h.
4. Atlikus temperatūros valdymo sistemos kokybės vertinimo tyrimą, gauta, jog norint pasiekti norimą valdymo sistemos kokybę, reikia esamą valdymo sistemos struktūrą papildyti kompensavimo grandimi, nes su ja pavyksta pašalinti trikdžio įtaką procese. O siekiant optimalaus rezultato, modifikuotoje valdymo sistemoje naudoti PI reguliatorių, suderintą, Chien Hrones Reswick (CHR) su 20 % metodu. Šiuo metodu gauti reguliatoriaus parametrai: $K_p = 0,406335$, $K_I = 0,004784$, o pereinamasis procesas vyksta leistinos statinės paklaidos ribose – 1 % aplink nuostatą.

Informacinių ir literatūros šaltinių sąrašas

1. PAFFEL, Kelly. Steam Process Control Methods. Inveno Engineering LLC, 2018.
2. SIMUTIS, Rimvydas, Donatas LEVIŠAUSKAS ir Giedrius STANKEVIČIUS. Technologinių procesų modeliavimas ir identifikavimas. Kaunas: Technologija, 1999.
3. ALEKSA, Vytautas ir Vytautas GALVANAUSKAS. Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. Kaunas: Technologija, 2008.
4. LEVIŠAUSKAS, Donatas. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.
5. LUYBEN, Michael L. and William L. LUYBEN. Essentials of Process Control. MC Graw – Hill, 1997.
6. ASTROM, Karl J. and Tore HAGGLUND. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd ed. Instrument Society of America, 1995.
7. VASICKANINOVÁ, Anna , Monika BAKOŠOVÁ and Juraj ORAVEC. Advanced Analytic and Control Techniques for Thermal Systems with Heat Exchangers. Academic Press, 2020.
8. Bennett, S. Development of the PID controller. In *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 58-62, 1993.
9. SHAW, John A.. The PID Control Algorithm. How it works, how to tune it, and how to use it, 2nd ed.. Process Control Solutions, 2003.
10. LEE, Ching-Hung. A survey of PID controller design based on gain and phase margins. *International Journal of Computational Cognition International Journal of Computational Cognition*. 2, 2004.
11. PATEL, Himanshu B. and S. N. CHAPHEKAR. Developments in PID Controllers: Literature Survey. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, Volume 1, Issue 5, 2012.
12. KAYA, Ibrahim and Derek P. ATHERTON. SIMPLE ANALYTICAL RULES FOR PI-PD CONTROLLERS TO TUNE INTEGRATING AND UNSTABLE PROCESSES. United Kingdom, Scotland: International control conference, 2006.
13. SHAH, Pritesh and Sudhir AGASHE. Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, Volume 38, 2016, pp. 29-41.
14. KUMAR, Vivek and Ashish PATRA. APPLICATION OF ZIEGLER-NICHOLS METHOD FOR TUNING OF PID CONTROLLER. *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. No. 8, Issue No. 02, 2016.
15. VASSILJEVA, Kristina. Control Instrumentation. Tallinn University of Technology: Department of Computed Control, 2015.
16. SUNG, Whan S. and Jietae LEE. Process identification and PID control. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. Singapoore, 2009.
17. STROSKI, Ney Pedro. PID controller tuning: CHR and CC methods. *Electricalibrary*, 2020.
18. VEČKYŠ, Algirdas, Jolanta REPŠYTĖ ir Virginijus BARANAUSKAS. Programiniai PID regulatoriai SIMATIC valdikliuose (TIA Portal). Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2019.
19. SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control Function Manual [interaktyvus]. Siemens manual, 2014. [žiūrėta 2024-05-04]. Prieiga per internetą:
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_74025/v1/s71500_pid_control_function_manual_enUS_en-US

20. FB_PID: PID Function Block Product Help [interaktyvus]. Schneider Electric manual, 2019. [žiūrėta 2024-05-04]. Prieiga per internetą: https://product-help.schneider-electric.com/Machine%20Expert/V2.0/en/TwiEmSup/TwiEmSup/Advanced_FBs/Advanced_FBs-5.htm
21. EcoStruxure Control Expert Control Block Library [ineraktyvus]. Schneider Electric manual, 2020. [žiūrėta 2024-05-04]. Prieiga per internetą: <https://www.se.com/us/en/download/document/33002535K01000/>
22. Logix 5000 Controllers General Instructions[interaktyvus]. Rockwell Automation manual, 2023. [žiūrėta 2024-05-04]. Prieiga per internetą: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1756-rm003_-en-p.pdf
23. Perform Common Process Loop Control Algorithms [interaktyvus]. Rockwell Automation manual, 2016. [žiūrėta 2024-05-04]. Prieiga per internetą: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/logix-wp008_-en-p.pdf
24. SIMUTIS, Rimvydas. Sistemų modeliavimas ir identifikavimas, mokomoji knyga. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, Vilnius, 2008.

Priedai

1 priedas. Algoritmas perdavimo funkcijos parametrų identifikavimui

```
% Duomenys
datae = [0 0; 1 0; 34 0; 38 0.154; 48 0.752; 62 2.67569; 76 4.83059; 92 7.46382; 108 9.781; 128
12.081; 151 15.63225; 167 18.00902; 183 20.119; 208 22.523; 229 23.307; 262 23.858; 340 23.9917]
% Atlikta šuolinė reakcija pakeičiama į vienetinę šuolinę reakciją
datae(:,2) = (datae(:,2)) / 10;
% II ilės perdavimo funkcijos su vėlavimu sprendinio pradiniai parametrai
K_gain = 2.386; T_pas1 = 10; T_pas2 = 10; L = 19;
% Pradiniai sprendiniai
data = []; data(:,1) = datae(:,1);
data(:,2) = K_gain * (1 - (T_pas1 / (T_pas1 - T_pas2))) * exp(-(datae(:,1) - L) / T_pas1)
) + (T_pas2 / (T_pas1 - T_pas2)) * exp(-(datae(:,1) - L) / T_pas2));
for j = 1 : 17
if (j,1) < 47.5
data(j,2) = 0;
end; end
% Nuokrypių kvadratų sumos skaičiavimas
kvad0 = sum((datae(:,2) - data(:,2)).^2);
delT = 1; delL = 1;
T_pas_n1 = T_pas1 - (delT_pas * randn);
T_pas_n2 = T1 - (delT_pas * randn); L1 = L - (delL * randn);
% Nauji sprendiniai
data1 = []; data1(:,1) = datae(:,1);
data1(:,2) = K_gain * (1 - (T_pas_n1 / (T_pas_n1 - T_pas_n2))) * exp(-(datae(:,1) - L1) /
T_pas_n1)) + (T_pas_n2 / (T_pas_n1 - T_pas_n2)) * exp(-(datae(:,1) - L1) / T_pas_n2)
);
for j = 1 : 17
if data1(j,1) < 47.5
data1(j,2) = 0;
end; end
% Nuokrypių kvadratų suma tarp pradinio ir naujo sprendinio
kvad = sum((datae(:,2) - data1(:,2)).^2);
% Optimaliu perdavimo funkcijos parametru paieška
for j = 1 : 99999
kvad2(j) = kvad; kvad3(j) = kvad0;
if kvad0 < kvad
Tn1 = T_pas_1 - (delT_pas * randn); T_pas_n2 = T_pas_2 - (delT_pas * randn); L1 = L - (delL *
randn);
data = []; data(:,1) = datae(:,1);
data(:,2) = K_gain * (1 - (T_pas1 / (T_pas1 - T_pas2))) * exp(-(datae(:,1) - L) / T_pas1)
) + (T_pas2 / (T_pas1 - T_pas2)) * exp(-(datae(:,1) - L) / T_pas2));
for j = 1 : 17
if data(j,1) < L
data(j,2) = 0;
```

```

end; end
data1 = [ ]; data1 ( : ,1 ) = datae( : ,1 );
data1( : ,2 ) = K_gain * ( 1 - ( T_pas_n1 / ( T_pas_n1 - T_pas_n2 ) ) * exp( - ( ( datae( : ,1 ) - L1 ) /
T_pas_n1 ) ) + ( T_pas_n2 / ( T_pas_n1 - T_pas_n2 ) ) * exp( - ( ( datae( : ,1 ) - L1 ) / T_pas_n2 ) )
);
for j = 1 : 17
if data1( j ,1 ) < L1
data1( j ,2 ) = 0 ;
end; end
kvad = sum( ( datae( : ,2 ) - y1( : ,2 ) ) . ^ 2 );
else
kvad0 = kvad; data = data1; T_pas1 = T_pas_n1;
T_pas2 = T_pas_n2; L = L1; T_pas_n1 = T_pas1 - (delT * randn); T_pas_n2 = T2 - (delT * randn);
L1 = L - ( delL * randn ); data1 = [ ]; data1( : ,1 ) = datae( : ,1 );
data1( : ,2 ) = K_gain * ( 1 - ( T_pas_n1 / (T_pas_n1 - T_pas_n2 ) ) * exp( - ( ( datae( : ,1 ) - L1 ) /
T_pas_n1 ) ) + ( T_pas_n2 / ( T_pas_n1 - T_pas_n2 ) ) * exp( - ( ( datae( : ,1 ) - L1 ) / T_pas_n2 ) )
);
for j = 1 : 17
if data1( j ,1 ) < L1
data1( j ,2 ) = 0;
end; end
kvad = sum( ( datae( : ,2 ) - y1( : ,2 ) ) . ^ 2 );
end; end
% Rezultatų atvaizdavimas
datam = [ ]; datam( : , 1 ) = 0 : 1 : 350;
datam( : , 2 ) = K_gain * ( 1 - ( T_pas1 / ( T_pas1 - T_pas2 ) ) * exp( - ( ( datam( : ,1 ) - L ) / T_pas1
) ) + ( T_pas2 / ( T_pas1 - T_pas2 ) ) * exp( - ( ( datam( : ,1 ) - L ) / T_pas2 ) ) );
for j = 1 : 351
if datam( j ,1 ) < L
datam( j ,2 ) = 0;
end; end
T_pas1; T_pas2; L;
plot ( datae ( : ,1 ), datae( : ,2 ), '*', 'MarkerEdgeColor',' b', 'MarkerSize', 10)
hold on
plot ( datam ( : ,1 ), datam( : ,2 ), 'r', 'LineWidth', 1.5 )
xlabel ('Laikas, s')
ylabel ('Temperatūra, °C')
title ('W_{temperatūros} reakcijos palyginimas į vienetinį šuolį su eksperimentiniais duomenimis')
grid on
legend ('Eksperimentiniai duomenys','Modelio sprendinys', 'Location', 'best')
ylim ( [0 3] )

```