



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo
sistemos kūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Deividas Katilius

Projekto autorius

Prof. Donatas Levišauskas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Deividas Katilius

Projekto autorius

Prof. Donatas Levišauskas

Vadovas

Lekt. Kęstutis Brazauskas

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Deividas Katilius

Amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Deivido Katiliaus, baigiamasis projektas tema „Amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo sistemos kūrimas 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.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Katilius, Deividas. Amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: amonio nitratas, granuliacija, valdymo sistema, identifikavimas, technologinis procesas.

Kaunas, 2020. 51 p.

Santrauka

Šio magistro studijų baigiamojo projekto tikslas yra sukurti bei iširti amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso valdymo sistemą. Darbe yra aptariama amonio nitrato gamybos technologija, plačiau nagrinėjamas amonio nitrato granuliacijos procesas – technologiniai įrengimai, optimalios proceso sąlygos, pagrindinės problemos bei reikalavimai sklandžiai gamybai. Analizuojamos chemijos pramonės technologiniuose procesuose dažniausiai naudojamos valdymo sistemos. Taip pat pateikiami aktyvių bei pasyvių eksperimentų, reikalingų amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso dinamikos identifikavimui, rezultatai. Turint eksperimentų rezultatus, identifikuojamas objektas – produkto temperatūros priklausomybė nuo oro slėgio granuliacijoje, produkto temperatūros priklausomybė nuo lauko oro temperatūros bei oro slėgio priklausomybė nuo ventiliatoriaus apsukų. Su šiomis perdavimo funkcijomis sudaromas modelis „*Matlab / Simulink*“ programiniame pakete bei projektuojama valdymo sistema – grįžtamojo ryšio su trikdžio kompensavimu. Grįžtamojo ryšio reguliatoriui naudojamas diskretinis PID pokyčių algoritmas, kuris derinamas ITAE kriterijumi – atliekamas tyrimas, kuris reguliatorius geriau pasiekia nuostato vertę – trikdžio įtakos ar nuostato įtakos reguliatorius. Taip pat atliekamas tyrimas, kuris iš trijų tiesioginio ryšio reguliatoriaus (kompensatoriaus) variantų geriau eliminuoja trikdžio įtaką, bei aptariamoms adaptacijos algoritmo realizavimo galimybės bei metodai.

Katilius, Deividas. Development and investigation of ammonium nitrate granulation technological process. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Donatas Levišauskas; Faculty of Electrical and electronics engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronics engineering (engineering sciences).

Keywords: ammonium nitrate, granulation, control system, identification, technological process.

Kaunas, 2020. 51 p.

Summary

The aim of this master's degree final thesis is to develop and investigate a control system for the technological process of ammonium nitrate granulation. The technology of ammonium nitrate production is discussed in the work, the process of ammonium nitrate granulation is analyzed in more detail – technological equipment, optimal process conditions, main problems and requirements for smooth production. The control systems most often used in the technological processes of the chemical industry are analyzed. The results of active and passive experiments required to identify the dynamics of ammonium nitrate granulation technological process are also presented. Having the results of experiments, the object is identified – the dependence of the product temperature on the air pressure in the granulation, the dependence of the product temperature on the outside air temperature and the dependence of the air pressure on the fan speed. With these transfer functions, a model is created in the „*Matlab / Simulink*“ software package, and a control system is designed – feedback/feedforward control system. A discrete changes PID algorithm is used for the feedback controller, which is optimised with ITAE criteria – a study is performed about which regulator faster reaches setpoint value. Also, a study is performed about which of the three options of the feedforward regulator (compensator) better eliminates the influence of disturbance, and the possibilities and methods of realization of the adaptation algorithm are discussed.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Technologinio proceso analizė.....	11
1.1. Technologinio proceso aprašymas	11
1.2. Aktuali technologinio proceso problema.....	13
1.3. Technologinio proceso parametrai	15
1.4. Išcentriniai ventiliatoriai poz. 23-1,2.....	15
2. Technologinių procesų valdymo sistemos	17
2.1. Dažniausiai analogiškuose technologiniuose procesuose naudojami valdymo sistemų tipai ..	17
2.1.1. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema.....	17
2.1.2. Grįžtamojo / tiesioginio ryšio valdymo sistema.....	18
2.1.3. Pakopinio (kaskadinio) valdymo sistema.....	19
2.2. Valdymo sistemos tipo parinkimas technologiniam procesui	21
3. Tiriamojo objekto identifikavimas	23
3.1. Eksperimentiniai duomenys	23
3.2. Produkto temperatūros priklausomybė nuo oro slėgio	26
3.3. Produkto temperatūros priklausomybė nuo lauko oro temperatūros.....	28
3.4. Oro slėgio priklausomybė nuo ventiliatoriaus elektros variklio apsukų	30
4. Sistemos modelio realizavimas „Matlab / Simulink“ aplinkoje	33
4.1. Objekto reakcijos į šuolinį trikdį aproksimavimas pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija	33
4.2. Grįžtamojo ryšio reguliatoriaus derinimas ir tyrimas.....	36
5. Tiesioginio ryšio reguliatoriaus (kompensatoriaus) derinimas ir tyrimas.....	42
6. Adaptyvios valdymo sistemos realizavimo galimybių tyrimas.....	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Technologinės schemos pozicijų paaiškinimai [2]	14
1.2 lentelė. Poz. 23-1,2 elektros variklių techniniai duomenys [3]	16
1.3 lentelė. Išcentrinių ventiliatorių poz. 23-1,2 techniniai duomenys [3].....	16
3.1 lentelė. Produkto temperatūros kitimo priklausomybė nuo paduodamo oro slėgio	23
3.2 lentelė. 2019m. Balandžio mėnesio oro slėgio bei produkto temperatūros vidurkiai	24
3.3 lentelė. 2019m. Balandžio mėnesio lauko temperatūros vidutinės vertės [16]	25
4.1 lentelė. Grįžtamojo ryšio reguliatorių parametrų palyginimas.....	38
5.1 lentelė. Skirtingų tipų tiesioginio ryšio reguliatorių perdavimo funkcijų palyginimas.....	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Amonio salietros lydalo granuliacijos proceso technologinė schema [2]	14
2.1 pav. Uždarosios valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu struktūrinė schema [18].....	17
2.2 pav. Šilumokaičio principinė schema [18]	18
2.3 pav. Tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [14].....	18
2.4 pav. G.C. Pereira [19] nagrinėjama dvisraigčio granulatoriaus tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema	19
2.5 pav. Kaskadinio valdymo sistemos struktūrinė schema [8]	20
2.6 pav. Buferinės talpos principinė technologinė schema [23].....	20
2.7 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema	21
3.1 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo oro slėgio pokyčio grafikas.....	24
3.2 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo oro slėgio perdavimo funkcijai rasti naudojamas „ <i>Matlab / Simulink</i> “ modelis	26
3.3 pav. Oro slėgio duomenų signalas	26
3.4 pav. Produkto temperatūros duomenų signalas	27
3.5 pav. Perdavimo funkcija aproksimuota produkto temperatūros kreivė.....	27
3.6 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo lauko temperatūros perdavimo funkcijai rasti naudojamas „ <i>Matlab / Simulink</i> “ modelis	28
3.7 pav. Produkto temperatūros kitimas 2019m. balandžio mėn.	28
3.8 pav. Aplinkos temperatūros kitimas 2019m. balandžio mėn.	29
3.9 pav. Perdavimo funkcija aproksimuota produkto temperatūros kreivė.....	29
3.10 pav. Ventilatoriaus poz. 23/2 ortakio schema [1].....	30
3.11 pav. Paduodamo granuliacijai oro slėgio pokytį nuo ventilatoriaus poz.23 elektros variklio apsukų aprašančios perdavimo funkcijos modelis „ <i>Matlab / Simulink</i> “ aplinkoje	31
3.12 pav. Perdavimo funkcijos modeliavimo rezultatas.....	32
4.1 pav. Modelis be valdymo sistemos, realizuotas „ <i>Matlab / Simulink</i> “ aplinkoje	33
4.2 pav. Modelis, naudojamas objekto reakcijos į trikdantį šuolį identifikavimui.....	34
4.3 pav. Šuolinės reakcijos eksperimento rezultatai: a – šuolinio trikdančio poveikio signalas, b – sistemos reakcija į šuolinį trikdantį poveikį	35
4.4 pav. Aproksimuotos bei originalios perdavimo funkcijos reakcijų palyginimas	36
4.5 pav. Diskretinio pokyčių PID reguliatoriaus realizavimas „ <i>Matlab / Simulink</i> “ aplinkoje.....	37
4.6 pav. Tyrimui naudojamas sistemos modelis su diskretiniu reguliatoriumi „ <i>Matlab / Simulink</i> “ aplinkoje	39
4.7 pav. Nuostato ir trikdžio reguliatorių reakcijų į nuostato signalą palyginimas	40
4.8 pav. Trikdančio poveikio signalas, naudojamas tyrimui atlikti.....	40
4.9 pav. Nuostato ir trikdžio reguliatorių reakcijos į lauko temperatūros trikdžio poveikį palyginimas	41
5.1 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu stiprinimo koeficientu, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija.....	43
5.2 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu spartinimo / vėlinimo grandimi, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija	44
5.3 pav. Tiesioginio ryšio reguliatoriaus (kompensatoriaus) struktūrinė schema „ <i>Matlab / Simulink</i> “ aplinkoje	44
5.4 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu spartinimo / vėlinimo grandimi su „ <i>Pade</i> “ aproksimacija, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija	45

5.5 pav. Visų tipų tiesioginio ryšio reguliatorių reakcijos į trikdančio poveikio signalą palyginimas	46
6.1 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema su adaptacijos algoritmu	47
6.2 pav. PID reguliatoriaus ir kompensatoriaus adaptyvaus valdymo realizavimo schema.....	48

Įvadas

Amonio nitratas (kitai – *amonio salietra*) – viena dažniausiai ūkio pramonėje naudojamų trąšų. Šios trąšos aprūpina augalą reikiamu azoto kiekiu, kuris stimuliuoja ir reguliuoja didžiąją dalį augalo gyvybinių ir su augimu susijusių procesų. Nors ši trąša yra viena pagrindinių ūkio pramonėje, tačiau jos gamybos technologija – itin sudėtingas procesas.

Šio darbo tikslas – išnagrinėti amonio nitrato granuliacijos technologinio proceso esmę bei problemas, sukurti bei ištirti automatinio valdymo sistemą. Pagrindinė šio technologinio proceso problema – prastai palaikoma amonio nitrato granulių temperatūra granuliacijos metu. Kadangi procesas neturi jokios automatinio valdymo sistemos, t. y. šiuo metu valdymas vyksta rankiniu būdu reguliuojant oro srauto sklendę, skirtingu metų ar paros metu produkto temperatūra nemažai svyruoja, nuo ko kenčia ir produkcijos kokybė. Taip pat literatūroje nebuvo rasta analogiškų ar panašių technologinių procesų valdymo sistemų pavyzdžių, todėl šis darbas aktualus įmonei, norint pagerinti gaminamos produkcijos kokybę bei gamavimo našumą.

Tyrimo uždaviniai:

1. atlikti technologinio proceso analizę išryškinant pagrindines problemas;
2. aptarti panašių granuliacijos ar chemijos pramonėje naudojamų automatinio valdymo sistemų tipus, pasiūlyti valdymo sistemos tipą tiriamajam technologiniam procesui;
3. išanalizuoti atliktus aktyvius ir pasyviuosius eksperimentus bei identifikuoti perdavimo funkcijas, reikalingas modelio sudarymui;
4. parengti grįžtamojo ryšio reguliatoriaus algoritmą bei suderinti reguliatorių pasirinktu kriterijumi ir ištirti jo dinamiką;
5. sudaryti ir ištirti kelis tiesioginio ryšio reguliatoriaus variantus bei nustatyti, kuris geriausiai eliminuoja trikdantį poveikį;
6. aptarti adaptyvaus valdymo algoritmo realizavimo galimybes.

1. Technologinio proceso analizė

1.1. Technologinio proceso aprašymas

Amonio salietros gamybos technologinis procesas susideda iš septynių pagrindinių stadijų [1]:

1. Žaliavų paruošimas:

1.1 Azoto rūgšties pašildymas:

Iš azoto rūgšties cecho rūgštis, ne žemesnės kaip 58 % koncentracijos, vienu iš esamų dviejų kolektorių išcentrinu siurbliu tiekama į vamzdinę azoto rūgšties šildytuvo ertmę, kur pašildoma iki 60–80 °C temperatūros. Šilumos agentas yra antrinis garas, kuris nukreipiamas iš neutralizatorių į šildytuvo tarpvamzdinę ertmę. Azoto rūgšties slėgį 0,3–0,4 MPa ribose reguliuoja azoto rūgšties cechas. Pašildyta azoto rūgštis paskirstoma į du lygiagrečiai veikiančius neutralizatorius.

1.2 Dujinio amoniako pašildymas:

Iš bendro įmonės kolektoriaus 0,2–0,35 MPa slėgio dujinis amoniakas patenka į skysto amoniako atskirtuvą / išgarintuvą, kur yra pašildomas 1,4–1,6 MPa slėgio garu, paduodamu į šildytuvus, sumontuotus aparato vidaus apatinėje dalyje. Iš atskirtuvo / nusėdintuvo amoniakas patenka į šildytuvo vamzdinę ertmę, kurioje pašildomas garo kondensatu, tiekiamu į šildytuvo tarpvamzdinę ertmę. Iš šildytuvo dujinis amoniakas patenka į slėgio reguliavimo mazgą, iš kurio, 0,18–0,25 MPa slėgiu, nukreipiamas į šildytuvo vamzdinę ertmę. Joje pašildomas 1,4 MPa slėgio garo kondensatu, tiekiamu į šildytuvo tarpvamzdinę ertmę. Pašildytas 70–170 °C temperatūros dujinis amoniakas paskirstomas į du lygiagrečiai veikiančius neutralizatorius.

1.3 Magnio nitrato tirpalo paruošimas:

Amonio salietros mechaninėms savybėms (kietumui, dulketumui) pagerinti į azoto rūgšties srautą prieš neutralizacijos procesą yra tiekiamas magnezitinis / brusitinis priedas. Šis priedas gaminamas iš magnezito arba brusito miltelių.

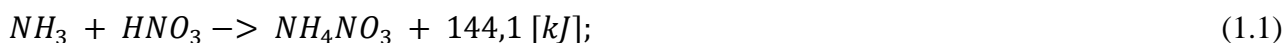
Magnezito / brusito milteliai iškraunami iš geležinkelio vagonų vakuuminiu pneumatiniu krautuvu ir nukreipiami į rezervuarus. Prieš pradėdant magnezito / brusito iškrovimo darbus, dulkių gražinimui į rezervuarą įjungiamas AS-3 ventiliatorius.

Magnio nitrato tirpalas gaminamas neslėginiuose, periodiškai veikiančiuose reaktoriuose. Į reaktorių dozuojama azoto rūgštis, upės vanduo, magnezitas arba brusitas taip, kad gautųsi reikiama MgO ir HNO₃ masės koncentracija. Skaidymo reakcijos metu (80 °C) išsiskiria išrūkos, kurios vamzdiny patenka į azoto rūgšties gamybos įrenginio „GP“ kamina. Paruoštas tirpalas nusėdinamas talpykloje. Toliau iš talpyklos siurbliu tirpalas tiekiamas į neslėgines talpyklas, kurios alsuokliu jungiasi su atmosfera.

2. Amonio salietros vandeninių tirpalų gavimas neutralizuojant nekoncentruotą azoto rūgštį dujiniu amoniaku:

Gamybos metodas: neslėginis dujinio amoniako neutralizavimas azoto rūgštimi, naudojant cheminės reakcijos metu išsiskyrusią vandens, atnešto su azoto rūgštimi, šilumą, išgarinimui bei išankstiniam azoto rūgšties pašildymui iki reikiamos temperatūros. Amonio salietros tirpalo gamyba vykdoma dviejuose lygiagrečiai veikiančiuose neslėginiuose reaktoriuose (neutralizatoriuose) ITN-68.

Azoto rūgštis ir dujinis amoniakas, po išankstinio pašildymo šilumokaičiuose, nukreipiami santykiu 63:17 į neutralizatorių reakcinę zoną. Reaktoriuose vyksta cheminė neutralizacijos reakcija:



Reakcijos metu ($t = 145\text{--}165\text{ }^\circ\text{C}$, $P \leq 8\text{ kPa}$) išsiskyrusios šilumos pakanka išgarinti vandenį, atkeliavusį su azoto rūgštimi, kad gautųsi reikiamos ($\geq 88\%$) koncentracijos tirpalas. Iš reaktorių pagamintas tirpalas savitaka nukreipiamas į papildomą neutralizatorių, į kurį papildomai tiekiamas dujinis amoniakas tirpalo pH (4,4–5,3) valdymui. Toliau amonizuotas tirpalas, praeidamas kontrolinį neutralizatorių, savitaka patenka į išgarinimo aparatą. Neutralizacijos metu susidaręs $105\text{--}140\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros antrinis garas iš reaktorių nukreipiamas į skruberį tolimesniam valymui.

Neutralizacijos proceso paleidimo ar stabdymo metu susidarę žemos koncentracijos tirpalai savitaka surenkami į neslėginę talpyklą poz.30, kurioje yra alsuoklis. Sukauptas žemos koncentracijos amonio salietros tirpalas siurbliu grąžinamas į reaktorių perdirbimui, t. y. koncentravimui.

3. Amonio salietros tirpalo išgarinimas:

Šis procesas vyksta išgarinimo aparate, kuriame tirpalas apdorojamas esant $175\text{--}185\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai ir atmosferiniam slėgiui. Proceso metu pasiekama ne mažesnė kaip $99,7\%$ koncentracija. Šilumos agentu naudojamas $1,4\text{ MPa}$ slėgio sotas garas bei pašildytas oras, kuris tiekiamas į aparatą orapūte. Iš išgarinimo aparato amonio salietros lydalas savitaka patenka į hidroužtvarą, kur, priklausomai nuo terpės, į lydalą automatiškai dozuojamas dujinis amoniakas.

4. Amonio salietros lydalo granuliavimas ir galutinio produkto atšaldymas:

Amonio salietros lydalas iš hidroužtvaros savitaka patenka į statinius granuliuojamus (6 vnt.). Amonio salietros lydalas granuliuojamas 12 m skersmens granuliacijos bokšte. Granulių kritimo aukštis 30 m . Statinių granuliatorių pagalba amonio salietros lydalas tolygiai išpurškiamas $10,6\text{ m}$ skersmens skrituliu. Krintantys žemyn amonio salietros tirpalo lašeliai susiduria su priešpriešiniu oro srautu ($500000\text{ m}^3/\text{h}$, $w = 1,8\text{ m/s}$), tiekiamu ventiliatoriumi, atvėsta ir kristalizuojasi pavirsdami į granules. Susikristalizavusios granulės atšaldomos „verdančiame“ sluoksnyje. Jų temperatūra turi būti $\leq 50\text{ }^\circ\text{C}$. Amonio salietra per iškrovimo įrenginį patenka į sijotuvus, vėliau ant transporterių, ir transportuojama į fasavimo / pakrovimo procesą.

5. Panaudoto oro, dujų, išskiriamų į atmosferą, valymas:

Dulkėtas oras iš granuliacijos bokšto, antriniai garai iš neutralizatorių ir garų / dujų mišinys iš išgarinimo aparato patenka į praplovimo skruberį. Praplovimo skruberis yra 12 m skersmens ir 9 m aukščio aparatas, kuriame sumontuotos keturios lėkštės. Amonio nitrato dulkių surinkimui ir amoniako neutralizavimui antra lėkštė yra laistoma parūgštintu amonio nitrato tirpalu, esančiu talpykloje, naudojant du siurblius. Skruberio laistymui naudojamas $15\text{--}25\%$ koncentracijos amonio nitrato tirpalas, kuriame palaikoma azoto rūgšties $10\text{--}20\text{ g/l HNO}_3$ masės koncentracija. Esant nepalankioms meteorologinėms sąlygoms, azoto rūgšties masės koncentracija mažinama iki 5 g/l . Panaudotas tirpalas per skruberio apačią grįžta į talpyklą. Trečioje lėkštėje sumontuota 30 vnt. filtrų (stiklo audinys KF-600-4), skirtų amonio nitrato purlams surinkti. Ketvirtos lėkštės paskirtis yra surinkti bei sulaukyti skysčio lašelius, kurie praeina pro trečios lėkštės filtrus. Išvalytas oro / dujų mišinys iš skruberio patenka į atmosferą.

6. Galutinio produkto fasavimas, sandėliavimas ir krova:

Amonio salietros cecho produkcijos sandėlyje yra atliekamos šios technologinės operacijos:

- amonio salietros apipurškimas praminiu;
- amonio salietros smulkus fasavimas į 50–60 kg talpos maišus ir krovimas į geležinkelio riedmenis bei į autotransportą;
- amonio salietros stambus fasavimas į 500–1200 kg talpos didmaišius geležinkelio riedmenyse ir autotransporto priemonėse arba krovimas autokrautuviu iš sandėlio;
- nefasuotos amonio salietros krovimas į autotransportą, konteinerius ir didžiuosius konteinerius;
- taros (maišų ir didmaišių) markiravimas, užrašant pagaminimo datą, partijos numerį ir galiojimo datą.

7. Amonio nitrato tirpalo, tiekiamo kalcio amonio salietros (*toliau – KAS*) žaliavos išgavimui ir realizacijai, gamyba:

AN tirpalo gamyba vykdoma dviejuose lygiagrečiai veikiančiuose neslėginiuose reaktoriuose (neutralizatoriuose) ITN-72. Tiekiamos žaliavos į reaktorius (azoto rūgštis ir dujinis amoniakas) pašildomos atitinkamuose šilumokaičiuose. Dujinis amoniakas pašildomas iki 120–150 °C temperatūros, o azoto rūgštis iki 60–80 °C temperatūros. Po išankstinio pašildymo šilumokaičiuose, žaliavos nukreipiamos santykiu 63:17 į neutralizatorių reakcinę zoną. Reaktoriuose vyksta cheminė neutralizacijos reakcija:



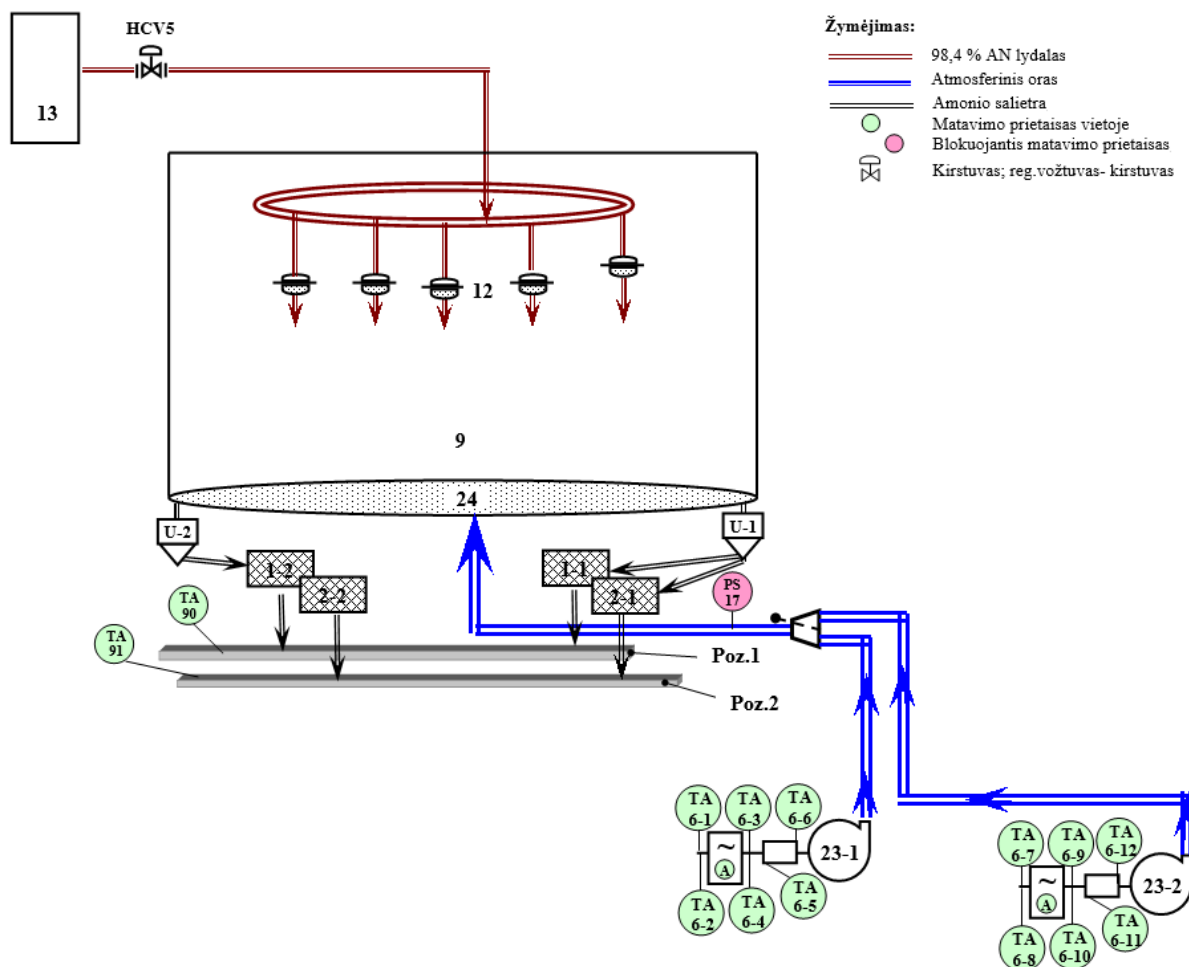
Reakcijos metu ($t = 155\text{--}165\text{ }^\circ\text{C}$, $P \leq 15\text{ kPa}$) išsiskyrusios šilumos pakanka išgarinti vandenį, atkeliavusį su azoto rūgštimi, ir gauti reikiamos ($91 \pm 2\%$) koncentracijos AN tirpalą. Iš reaktorių pagamintas tirpalas savitaka nukreipiamas į AN tirpalo talpyklą tiekti KAS gamybai ir į AN tirpalo talpyklą – periodinei AN tirpalo gamybai. Neutralizacijos metu susidaręs antrinis garas, 120–140 °C temperatūros ir 2,5–9 pH, iš reaktorių nukreipiamas į amonio salietros cecho skruberį tolimesniam valymui.

1.2. Aktuali technologinio proceso problema

Atlikus technologinio proceso analizę buvo nuspręsta tyrimo objektu pasirinkti ketvirtąjį – amonio salietros lydalo granuliavimo ir gautojo produkto atšaldymo etapą, kadangi jis yra tiesiogiai susijęs su gaunamos produkcijos kokybe ir šiuo metu neturi jokios valdymo sistemos.

12 m skersmens ir 30 m aukščio granulatoriaus viršuje amonio salietros lydalas tolygiai išpurškiamas 10 m spinduliu. Krisdamas žemyn jis susiduria su priešpriešiniu oro srautu, kurį palaiko išcentriniai ventiliatoriai poz. 23-1 ir 23-2. Kadangi ventiliatorių tiekiamo oro temperatūra priklauso nuo lauko temperatūros, skiriantis metų laikams ar vidutinei dienos temperatūrai, įvykus amonio salietros lydalo kristalizacijai, granulių temperatūra taip pat skiriasi. Nors technologijos apraše deklaruojama, jog granulių temperatūra gali siekti iki 50 °C, tačiau tinkamiausia granulių frakcija gaunama kai jų temperatūra siekia 29 °C. Esant aukštesnei lauko temperatūrai granulės efektyviai neatvėsinaamos, t. y. jų temperatūra siekia 40–50 °C, jos labiau išsipučia. Fasuojant tokias granules į vienos tonos talpos maišus, sutalpinama tik apie 930–970 kg produkcijos. Esant žemai lauko temperatūrai, atvėsintų granulių temperatūra gali būti net ir 1 °C. Abiem atvejais sistemos resursai naudojami neefektyviai:

be reikalo naudojama elektros energija bei nepalaikoma tinkama produkcijos kokybė. Technologinė amonio salietros lydalo granuliacijos proceso schema pavaizduota 1.1 pav.



1.1 pav. Amonio salietros lydalo granuliacijos proceso technologinė schema [2]

Lentelėje paaiškinamos visos technologinės schemos pozicijų reikšmės:

1.1 lentelė. Technologinės schemos pozicijų paaiškinimai [2]

Pozicija	Pavadinimas	Charakteristika
1 / 2	Transporteris	-
9	Granuliacijos bokštas	D = 12m
12	Statinis granulatorius (5 vnt.)	Skylučių d = 1,15mm
13	Hidroužtvara	H = 3050mm, D = 325mm, V = 0,25m ³
24	Granulių atšaldymo aparatas	D = 10,71m, F = 90m ²
23-1 / 23-2	Išcentrinis ventiliatorius	Q = 500.000m ³ /h, P = 1,1 MW
U-1 / U-2	Oro užtvara	-
1-1 / 1-2	Sijotuvai poz.1 transporterio	D = 1000mm, L = 2500mm
2-1 / 2-2	Sijotuvai poz.2 transporterio	D = 1000mm, L = 2500mm
HCV5	Kirstuvas	-

1.3. Technologinio proceso parametrai

Granuliacijos procese produkto kokybės ir technologinio proceso saugumo užtikrinimui numatytos signalizacijos ir blokuotės, kurios automatiškai stabdo technologinį procesą, jei pažeidžiamas bent vienas iš šių blokuojančių parametru [1]:

- minimalus oro slėgis po granuliu atšaldymo aparato grotelėmis 2 kPa (200 kg/m²);
- maksimalus oro slėgis po granuliu atšaldymo aparato grotelėmis 5 kPa (500 kg/m²);
- sustojus transporteriams poz.1,2 ilgiau nei 5 min;
- užsidarius kirstuvui HCV5;

Kiti šioje technologinio proceso dalyje matuojami bei indikuojami parametrai [1]:

- granuliu temperatūra ant transporteriu poz. 1,2 juostu (iki 50 °C);
- išcentrinu ventiliatoriu poz. 23-1,2 elektros variklio pirmoju slydimo guolio temperatūra (2 termoporos, iki 75 °C);
- išcentrinu ventiliatoriu poz. 23-1,2 elektros variklio antroju slydimo guolio temperatūra (2 termoporos, iki 75 °C);
- išcentrinu ventiliatoriu poz. 23-1,2 veleno pirmoju guolio temperatūra (1 termopora, iki 75 °C);
- išcentrinu ventiliatoriu poz. 23-1,2 veleno pirmoju guolio temperatūra (1 termopora, iki 75 °C);

1.4. Išcentriniai ventiliatoriai poz. 23-1,2

Reguluoti išcentrinu ventiliatoriu poz. 23-1,2 oro srautu į granuliacijos bokštu šiuo metu galima tik mechaniškai reguliuojant ortakiu atidarymą. Ventiliatoriai greičio reguliavimo galimybu neturi. Vasaros dienomis, kai lauko temperatūra yra aukšta, vienas ventiliatorius neataušina granuliu iki reikiamos temperatūros (o įjungus antrąjį ventiliatoriu oro slėgis po granuliu atšaldymo aparato grotelėmis viršytu 5 kPa ir technologinis procesas būtų stabdomas), todėl tenka sumažinti gamybos tempus reguliuojant kirstuvą poz. HCV5. Gamybos tempą galima atstatyti tik naktį, kai lauko oro temperatūra nukrenta.

Tačiau žiemą, kai lauko oro temperatūra yra žema, vieno ventiliatoriaus pajėgumo užtenka atvėsinti granules iki 1 °C, nors tinkamiausia temperatūra yra 30 °C. Ortakiu atidarymo reguliavimas šią problemą gali išspręsti, tačiau jis naudojamas pakankamai retai ir yra labai neefektyvus – bereikalingai švaistoma elektros energija ir nuo ventiliatoriu skleidžiamos vibracijos ortakiai po kurio laiko vis tiek atsidaro.

Šiu ventiliatoriu nominali galia siekia 1100 kW, todėl jų paleidimas yra komplikotas: pirmiausia dispečeriui turi būti pranešta apie planuojamą variklio paleidimą, tada, gavus leidimą, turi būti uždaromi ortakiai (nuimama apkrova nuo variklio), paleidžiamas pirmasis elektros variklio greitis (598 aps/min), laukiama, kol ventiliatoriaus vartojama elektros srovė nusistovi (apie 1–2 min.), tuomet leidžiamas antrasis elektros variklio greitis (748 aps/min) ir, nusistovėjus srovei, atidaromi ortakiai, t. y. apkraunamas ventiliatorius. Dėl šių sąlygu, kuriant automatinę valdymo sistemą, ventiliatoriu greičio reguliavimas dažnio keitikliu labai supaprastintų ne tik proceso temperatūros reguliavimą, bet ir elektros variklio paleidimo procesą.

1.2 lentelė. Poz. 23-1,2 elektros variklių techniniai duomenys [3]

Pozicija	Ventiliatorius poz. 23-1	Ventiliatorius poz. 23-2
Tipas	DAZO 1926-8/10Y1	DAZO 1926-8/10Y1
Galingumas, kW	I greičio – 625 II greičio – 1100	I greičio – 625 II greičio – 1100
Gamyklinis Nr.	136	136
Apsisukimų sk/min.	I greičio – 598 II greičio – 748	I greičio – 598 II greičio – 748
Įtampa, kV	6	6
Srovė, A	I greičio – 92 II greičio – 160	I greičio – 92 II greičio – 160
cos fi	I greičio – 0,77 II greičio – 0,78	I greičio – 0,77 II greičio – 0,78
Naudingumo koeficientas, %	I greičio – 85,6 II greičio – 85	I greičio – 85,6 II greičio – 85
Prijungimo būdas	Žvaigždė	Žvaigždė

1.3 lentelė. Išcentrinių ventiliatorių poz. 23-1,2 techniniai duomenys [3]

Pozicija	Ventiliatorius poz. 23-1	Ventiliatorius poz. 23-2
Oro kiekis Q	500.000 m ³ /h	500.000 m ³ /h
Oro slėgis P	600 mm H ₂ O st.	600 mm H ₂ O st.
Terpė	Atmosferos oras (lauko aplinkos oras)	Atmosferos oras (lauko aplinkos oras)
Vidutinė aplinkos oro temperatūra	6,5 °C	6,5 °C
Maksimali aplinkos oro temperatūra	35 °C	35 °C
Minimali aplinkos oro temperatūra	-36 °C	-36 °C

2. Technologinių procesų valdymo sistemos

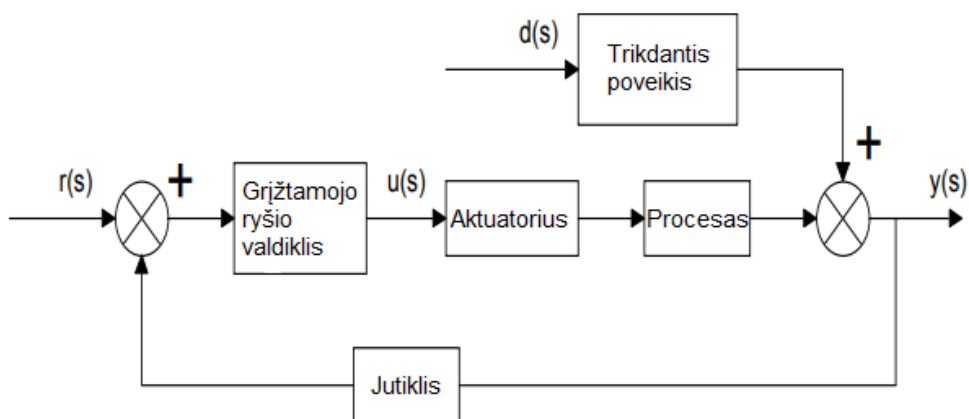
Pagrindinis technologinių procesų valdymo sistemų tikslas yra pagerinti proceso saugumą, stabilumą, kokybinius bei kiekybinius proceso parametrus: gamybos našumą, produkto išeią, tuo pačiu metu užtikrinant kuo aukštesnę produkcijos kokybę (tinkamą temperatūrą, frakciją ir t. t.) [4]. Praktikoje šiam tikslui pasiekti naudojami labai įvairūs būdai, tačiau apžvelgiami tik dažniausiai pramonėje naudojami metodai.

2.1. Dažniausiai analogiškuose technologiniuose procesuose naudojami valdymo sistemų tipai

Šiuo metu pramonėje naudojami amonio nitrato gamybos metodai naudoja kitokią granuliacijos technologiją, negu šiame darbe tiriamas technologinis procesas. Daugumoje šiuo metu naudojamų technologinių procesų granuliavimas ir produkcijos atvėsinimas yra paskirstomi į du atskirus etapus [21], o tiriamajame technologiniame procese granuliacija ir produkcijos galutinis atvėsinimas vyksta vienu etapu. Daugumoje dabar projektuojamų amonio nitrato gamybos cechų amonio nitratas pirmiausia atvėsinamas ir tik vėliau produktas smulkinamas [5], kad būtų galima išgauti reikiamos frakcijos granules, o tiriamajame procese amonio nitratas jau išpurškiamas lašeliais ir vėsinamas priešpriešiniu oro srautu. Būtent dėl šios priežasties toliau apžvelgiami analogiški ar susiję granuliacijos valdymo sistemų tipai ne tik trąšų gamyboje, bet ir medikamentų gamybos procesuose ar pramoninėse temperatūros reguliavimo sistemose.

2.1.1. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema

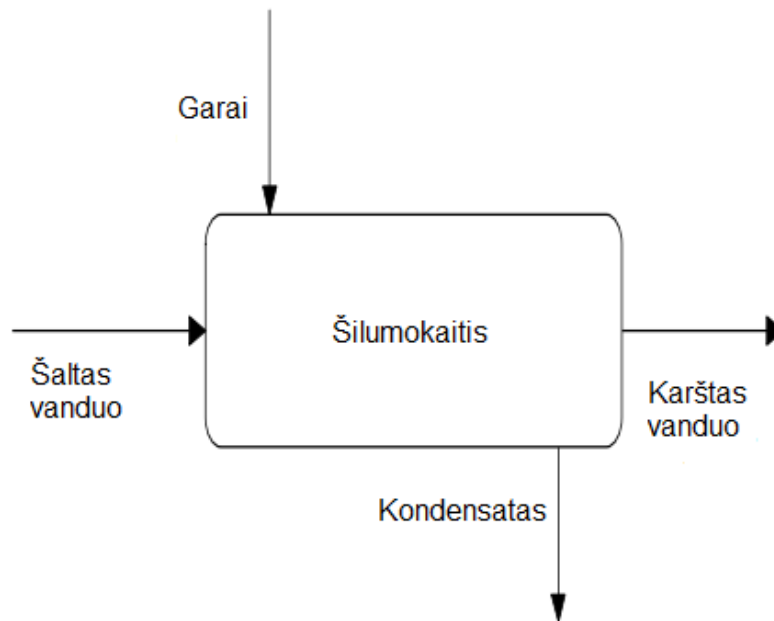
Plačiausiai pramonėje naudojamas valdymo sistemos tipas – grįžtamojo ryšio valdymo sistema (2.1 pav.) [22]. Jos veikimo principas pagrįstas nuokrypio signalu, t. y. skirtumu tarp nuostato dydžio ir proceso kintamojo dydžio kurį matuoja jutiklis, o valdiklis atitinkamai koreguoja valdantįjį signalą nustatytai vertei pasiekti [11].



2.1 pav. Uždarnosios valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu struktūrinė schema [18]

Uždarąją valdymo sistemą S. Padhee nagrinėja šilumokaičio valdymo sistemoje [18]. Šilumokaitis perduoda šilumą tarp dviejų skysčių jų nesumaišant tarpusavyje. Jo dinamika priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip skysčių temperatūros skirtumas, šilumos perdavimo plotas šilumokaičio viduje ir skysčių tekėjimo greitis sistemoje. Šilumokaitis naudojamas įvairiose pramonės srityse – naftos,

maisto, branduolinėje bei chemijos pramonėse. Šilumokaičio principinė schema pavaizduota 2.2 paveiksle.

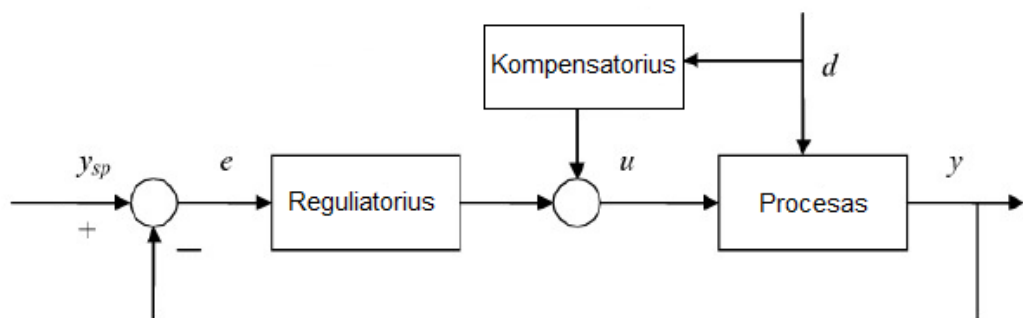


2.2 pav. Šilumokaičio principinė schema [18]

Šiuo atveju valdymo sistema pagal karšto vandens temperatūrą koreguoja garų kiekį nustatytai vertei pasiekti, t. y. šalto vandens srauto valdymo sistema nekoreguoja. Toks valdymo sistemos principas dažnai naudojamas valdymo sistemose ne vien tik pramonėje, tačiau esant nenumatytiems trikdantiems poveikiams, pvz.: šalto vandens srauto ar temperatūros kitimui, valdymo signalas nuokrypį eliminuoja tik tada, kai jis paveikia išeinančio karšto vandens temperatūrą.

2.1.2. Grįžtamojo / tiesioginio ryšio valdymo sistema

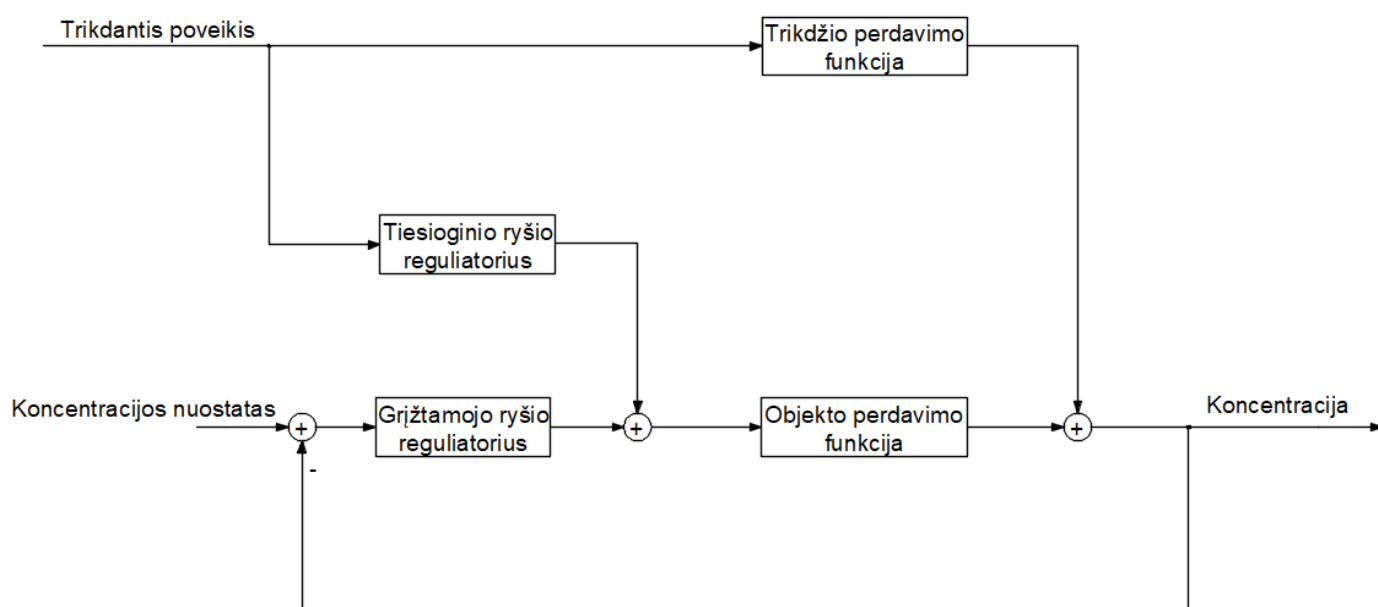
Nepertraukiamoje gamyboje, siekiant kuo efektyviau užtikrinti tinkamą produkcijos kokybę esant įvairioms aplinkos sąlygoms, dažnai naudojamas uždarnosios valdymo sistemos su tiesioginio ryšio regulatoriumi (kompensatoriumi) tipas (2.3 pav.).



2.3 pav. Tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema [14]

Šios valdymo sistemos privalumai – ne tik palaikomas nuostato signalas, bet ir kompensuojamas trikdančio signalo poveikis, dar nepaveikus proceso išėjimo parametro.

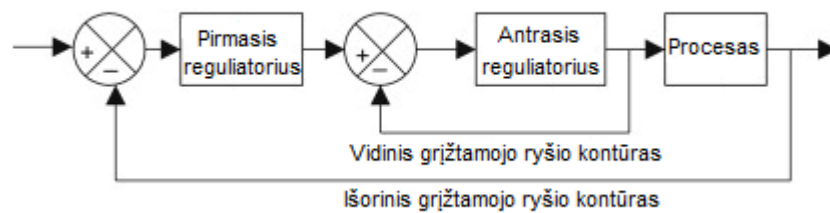
Šios valdymo sistemos pavyzdys – dvisraigtis granuliatorius, dažnai naudojamas farmacijos pramonėje, kadangi turi galimybę sudrėkinti granuliuotus miltelius, naudodamas mažesnes skysčių koncentracijas bei palaikyti didesnę gaminamo produkto nuoseklumą [24]. G.C. Pereira [19] nagrinėja granuliatorių, kuris turi du įėjimus – 12 % koncentracijos reagento ir pagalbinės medžiagos bei vieną išėjimą – galutinio produkto. Pirmasis parametras, naudojamas grįžtamojo ryšio sistemoje, yra gaunamo mišinio koncentracija po granuliacijos proceso, valdantysis poveikis – pagalbinės medžiagos srautas. Tiesioginio ryšio reguliatorius matuoja įeinančio į granuliatorių reagento koncentraciją ir taip pat koreguoja pagalbinės medžiagos srautą, kad kintant aplinkos sąlygoms ar atsiradus reagento koncentracijos nuokrypiui būtų palaikoma tinkama galutinio produkto koncentracija. Nagrinėjamo pavyzdžio valdymo sistemos struktūrinis modelis pateiktas 2.4 paveiksle.



2.4 pav. G.C. Pereira [19] nagrinėjama dvisraigtio granuliatoriaus tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistemos struktūrinė schema

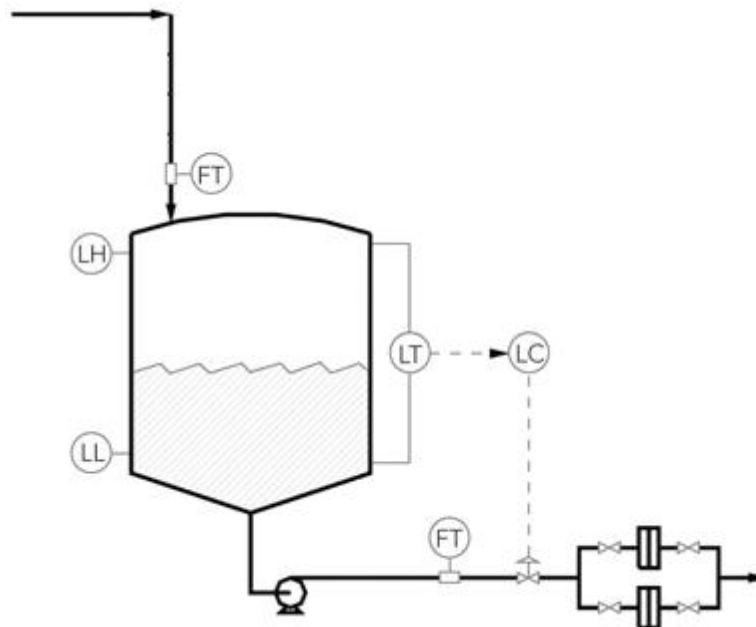
2.1.3. Pakopinio (kaskadinio) valdymo sistema

Sistemoje, turint du valdomuosius parametrus, kurie priklausomi tarpusavyje, tačiau turi skirtingas dinamikas, racionalu naudoti būtent kaskadinio valdymo sistemą (2.5 pav.). Ją sudaro vidinis bei išorinis valdymo kontūrai – pirmasis (*master*) reguliatorius pagal nuokrypio signalą koreguoja užduoties signalą kaip nuostatą antrajam (*slave*) reguliatoriui, taip greičiau reaguojant į trikdančius poveikius [17].



2.5 pav. Kaskadinio valdymo sistemos struktūrinė schema [8]

C. L. Smith [23] nagrinėja dažnai chemijos ar naftos pramonėje naudojamą įrenginį – buferinę talpą, iš kurios reagentas pastoviu srautu filtruojamas per filtras bei vamzdynu nukreipiamas tolesniam apdirbimui. Principinė įrengimo schema pavaizduota 2.6 paveiksle.



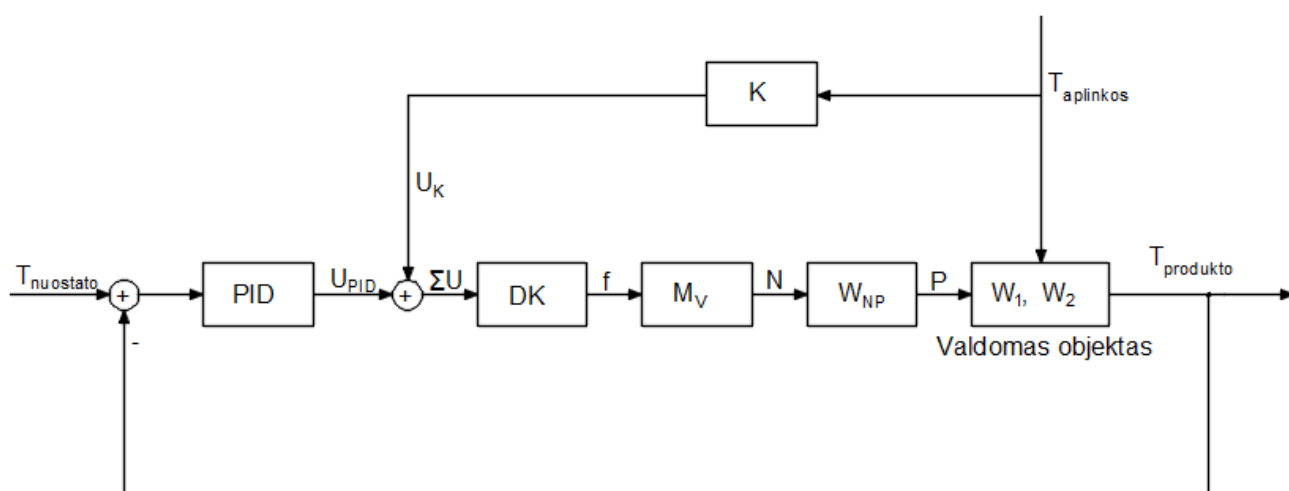
2.6 pav. Buferinės talpos principinė technologinė schema [23]

Pagrindinė valdymo problema – filtras kas 8 valandas turi būti keičiamas. Kiekvieną kartą vieno filtro sklendės užsukamos ir atsukamos kito filtro – tuo metu padidėja paduodamo reagento į technologinį procesą srautas. Tinkamam ištekančio reagento srautui ir jo lygiui talpoje palaikyti suprojektuota kaskadinė valdymo sistema. Kadangi srauto padidėjimas reagento lygiui talpoje didelės įtakos nesudaro, nes jos tūris yra didelis ($10\,000\text{ m}^3$) palyginus su ištekančio reagento kiekiu (200 l/min), todėl vidiniame kaskadinės valdymo sistemos kontūre yra suprojektuotas ištekančio reagento srauto reguliatorius, kuris sparčiau reaguoja į ištekančio kiekio pokytį, o išoriniame valdymo sistemos kontūre – buferinės talpos lygio reguliatorius, skirtas palaikyti reagento lygį reikiamose ribose, kad talpa nepersipildytų ir neištuštėtų. Kaskadinės valdymo sistemos padeda tiksliau valdyti du ar daugiau skirtingų vienas nuo kito priklausomų parametrų, tačiau derinant tokias sistemas reiktų atsižvelgti, jog bendra objekto valdymo kokybė priklauso ne tik nuo tam tikro kontūro reguliatoriaus parametrų, bet ir nuo kito kartu naudojamo reguliatoriaus parametrų.

2.2. Valdymo sistemos tipo parinkimas technologiniam procesui

Amonio nitrato granuliacijos technologiniame procese apkrovos, t. y. tiekiamo produkto kiekis granuliacijai dažniausiai būna pastovus, o reguliuojamas parametras – granulių temperatūra. Taigi, galima teigti, jog lauko temperatūra yra trikdžis, kuriam tikslaus modelio sudaryti yra neįmanoma, atsižvelgiant į dažnus mūsų klimato oro temperatūros pokyčius, todėl atviroji valdymo sistema šiam uždaviniui spręsti yra netinkama. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema norimą produkto temperatūrą palaikytų tiksliau, tačiau kompensuotų lauko oro temperatūros trikdžio poveikį tik jam paveikus produkto temperatūrą. Tokiu atveju, racionaliausias sprendimas amonio nitrato granuliacijos technologiniam procesui yra būtent tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistema. Naudojant šio tipo valdymo sistemą matuojama ir granulių temperatūra, ir lauko oro temperatūros pokytis, taip palaikant optimalią produkto temperatūrą bei kompensuojant trikdžio poveikį jam dar nespėjus paveikti produkto temperatūros.

Turint pagrindines objekto dinamiką aprašančias perdavimo funkcijas galima sudaryti valdymo sistemos struktūrinę schemą. Sudarytas preliminarus valdymo sistemos modelis pavaizduotas 2.7 pav.



2.7 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema

Čia:

- PID – grįžtamojo ryšio reguliatorius;
- DK – dažnio keitiklis;
- M_V – ventiliatoriaus elektros variklis;
- W_{NP} – perdavimo funkcija, aprašanti oro slėgio priklausomybę nuo ventiliatoriaus elektros variklio apsukų;
- W_1, W_2 – valdomojo objekto perdavimo funkcijos;
- K – tiesioginio ryšio reguliatorius (kompensatorius);

Tai grįžtamojo ryšio sistema su išorinio trikdžio kompensavimu. Sistemos veikimas pagrįstas temperatūros nuostato signalu, pagal kurį reguliatorius koreguoja dažnio keitiklio išėjimo dažnį

ventiliatoriaus elektros varikliui, norimos produkto temperatūros palaikymui, keičiant oro slėgį granuliacijos bokšte, atsižvelgiant į esamą produkto temperatūrą. Kompensavimo blokas, šiuo atveju atsižvelgdamas į aplinkos temperatūros pokytį koreguoja signalo U_K vertę trikdžio poveikio eliminavimui, kai skirtingu paros ar metų laiku temperatūra keičiasi.

3. Tiriamojo objekto identifikavimas

Tiriamajam objektui identifikuoti reikia trijų perdavimo funkcijų:

1. produkto temperatūros priklausomybės nuo oro slėgio pokyčio;
2. produkto temperatūros priklausomybės nuo lauko temperatūros pokyčio;
3. oro slėgio priklausomybės nuo ventiliatoriaus elektros variklio apsukų.

3.1. Eksperimentiniai duomenys

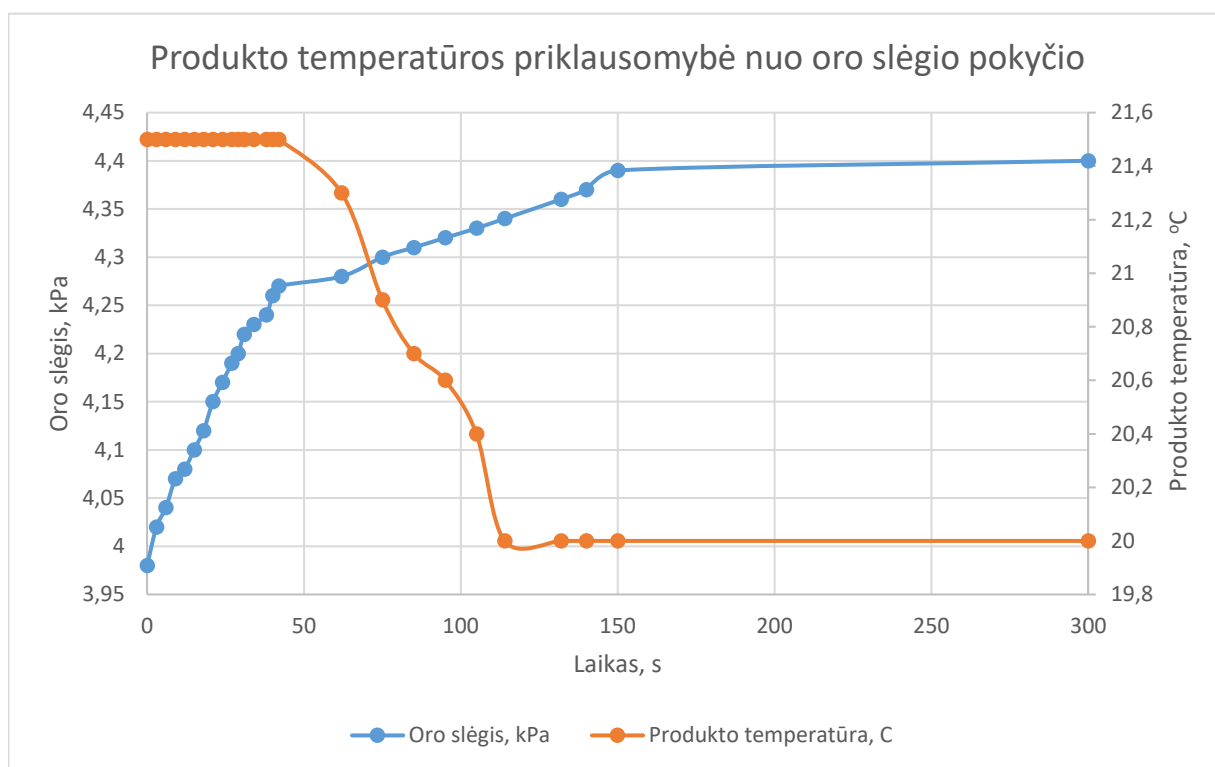
Pirmosioms dviem perdavimo funkcijoms rasti reikalingi eksperimentiniai duomenys, kadangi skaičiuojant yra didelė tikimybė neįvertinti tam tikrų svarbių veiksnių [20], turinčių įtaką oro slėgiui ar produkto temperatūrai, taip pakenkiant perdavimo funkcijų tikslumui.

Pirmajai objekto perdavimo funkcijai rasti buvo atliekamas aktyvus eksperimentas. Vykstant nenutrūkstamai gamybai, šuoliškai pakeisti oro slėgio nėra galimybės, todėl keičiant oro slėgi granuliuojant leidžiamose ribose nuo 4,0 kPa iki 4,4 kPa, kad technologinis procesas nesustotų, reguliuojant ventiliatoriaus sklendę rankiniu būdu, buvo stebėtas produkto temperatūros pokytis ant transporterio poz.1 linijos. Gautieji duomenys pavaizduoti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Produkto temperatūros kitimo priklausomybė nuo paduodamo oro slėgio

Laikas, s	Oro slėgis, kPa	Produkto temperatūra, °C
0	3,98	21,5
3	4,02	21,5
6	4,04	21,5
9	4,07	21,5
12	4,08	21,5
15	4,1	21,5
18	4,12	21,5
21	4,15	21,5
24	4,17	21,5
27	4,19	21,5
29	4,2	21,5
31	4,22	21,5
34	4,23	21,5
38	4,24	21,5
40	4,26	21,5
42	4,27	21,5
62	4,28	21,3
75	4,3	20,9
85	4,31	20,7
95	4,32	20,6
105	4,33	20,4

Laikas, s	Oro slėgis, kPa	Produkto temperatūra, °C
114	4,34	20
132	4,36	20
140	4,37	20
150	4,39	20
300	4,4	20



3.1 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo oro slėgio pokyčio grafikas

Antrosios perdavimo funkcijos identifikavimui reikalingi duomenys, kaip lauko temperatūra daro įtaką gaminamo produkto temperatūrai. Šiam tikslui buvo atliktas pasyvus eksperimentas – atrinkti duomenys iš bazėje registruojamų duomenų, kai paduodamo granuliacijai oro slėgis yra nekintantis, tačiau lauko oro temperatūra kinta. Duomenų reikalavimus atitiko 2019 metų balandžio mėnesio sistemos duomenys: vidutinis ventiliatorių poz. 23 oro slėgis kito labai nežymiai, o produkto temperatūros pokytis buvo pakankamai akivaizdus, todėl remiantis šiais duomenimis galima daryti išvadą, jog lauko temperatūros pokytis turėjo didžiausią įtaką produkto temperatūrai. Oro slėgio bei produkto temperatūros matavimų duomenys pavaizduoti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. 2019m. Balandžio mėnesio oro slėgio bei produkto temperatūros vidurkiai

Pozicija	Pavadinimas	2019 m. 04 mėn. dienų tech. parametrų vidurkiai						Vidurkis mėnesio
		1–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	
PIRSA17	Poz.23 oro slėgis prieš VS, kPa	3,79	3,78	3,86	3,80	3,70	3,63	3,76
TIRA90	Produkto temperatūra, °C	36,49	36,84	31,51	40,57	44,80	46,65	39,48

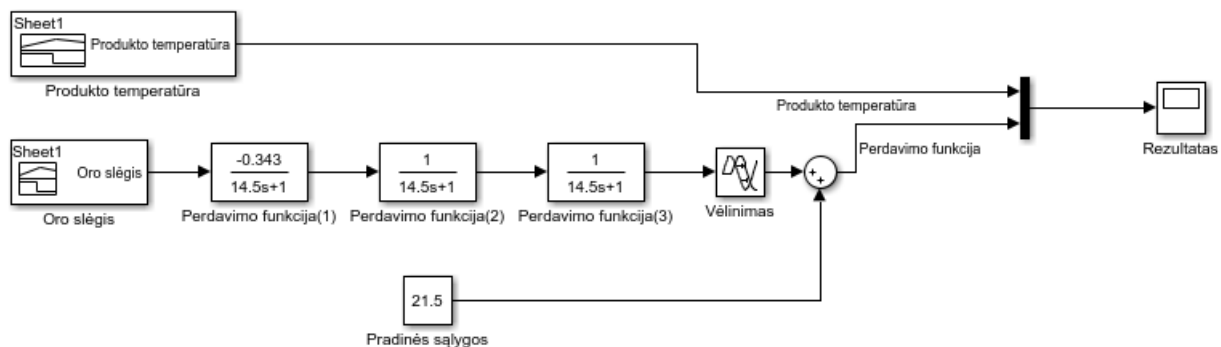
Norint identifikuoti lauko temperatūros daromą poveikį produkto temperatūrai, reikia gauti informaciją apie vidutinę lauko oro temperatūrą tame regione. Tam tikslui accuweather.com [16] internetiniame puslapyje buvo rasti bei išanalizuoti to paties regiono vidutinės temperatūros duomenys, pavaizduoti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. 2019m. Balandžio mėnesio lauko temperatūros vidutinės vertės [16]

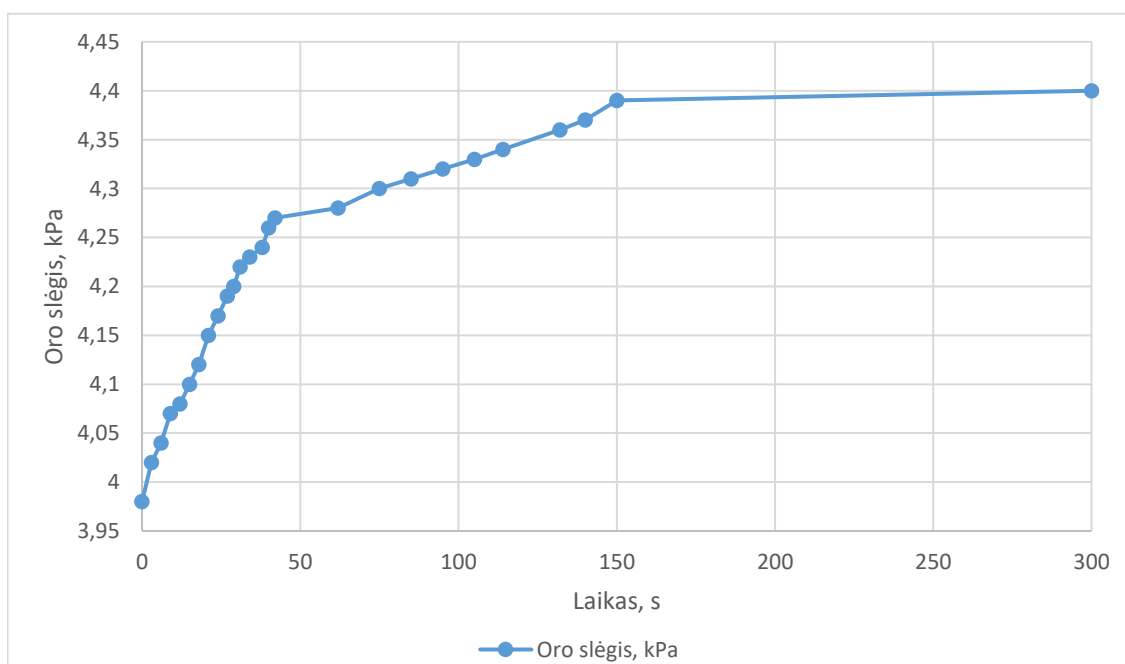
Diena	Vidutinė paros temperatūra, °C	Vidutinė penkių parų temperatūra, °C
1	3	5,5
2	3	
3	6,5	
4	7	
5	8	
6	9,5	6
7	9	
8	7	
9	3	
10	1,5	
11	2,5	3
12	1,5	
13	3	
14	4	
15	4	
16	7,5	10,3
17	10,5	
18	11	
19	11	
20	11,5	
21	8	11,9
22	11,5	
23	11	
24	13,5	
25	15,5	
26	17,5	15,6
27	19,5	
28	16,5	
29	13	
30	11,5	

3.2. Produkto temperatūros priklausomybė nuo oro slėgio

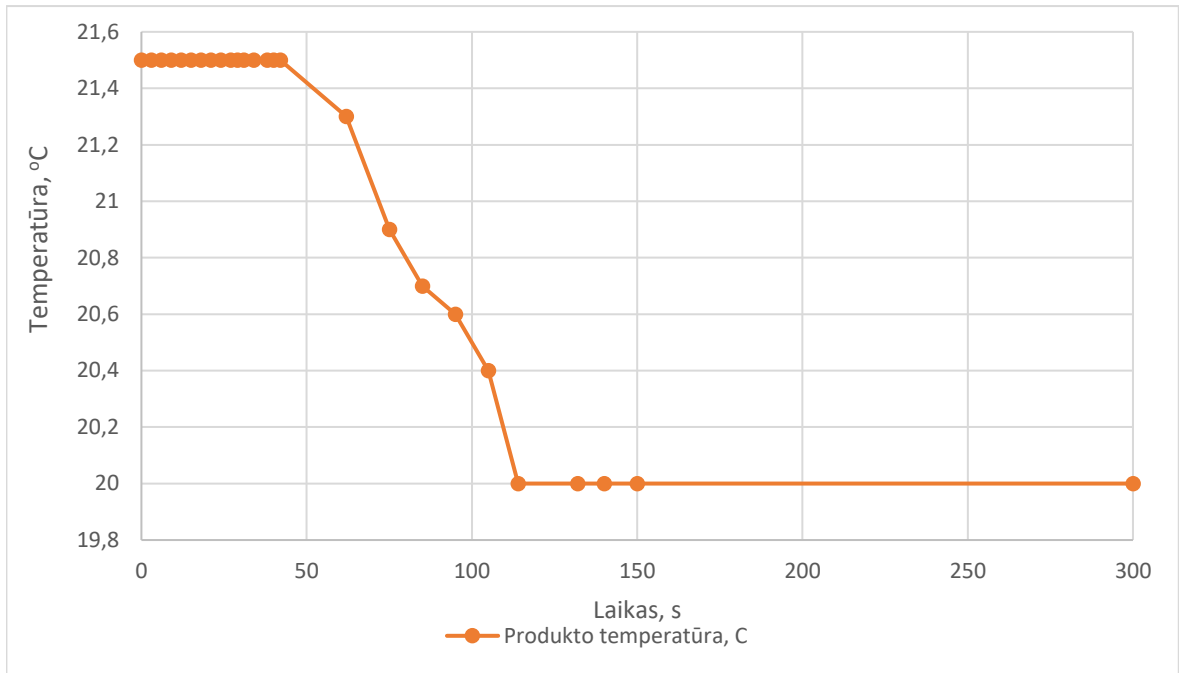
Perdavimo funkcijai tarp produkto temperatūros ir oro slėgio rasti naudojamas „*Matlab / Simulink*“ programinis paketas. Kadangi eksperimento metu šuoliško oro slėgio pokyčio gauti nepavyko dėl techninių proceso parametrų, todėl pritaikyti paprastesnių perdavimo funkcijų skaičiavimo metodų nėra galimybės. Dėl šios priežasties perdavimo funkcija rasta bandymų metodu. Sudarytas modelis perdavimo funkcijai rasti pavaizduotas 3.2 paveiksle, importuotų signalų blokai – 3.3 bei 3.4 paveiksluose.



3.2 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo oro slėgio perdavimo funkcijai rasti naudojamas „*Matlab / Simulink*“ modelis

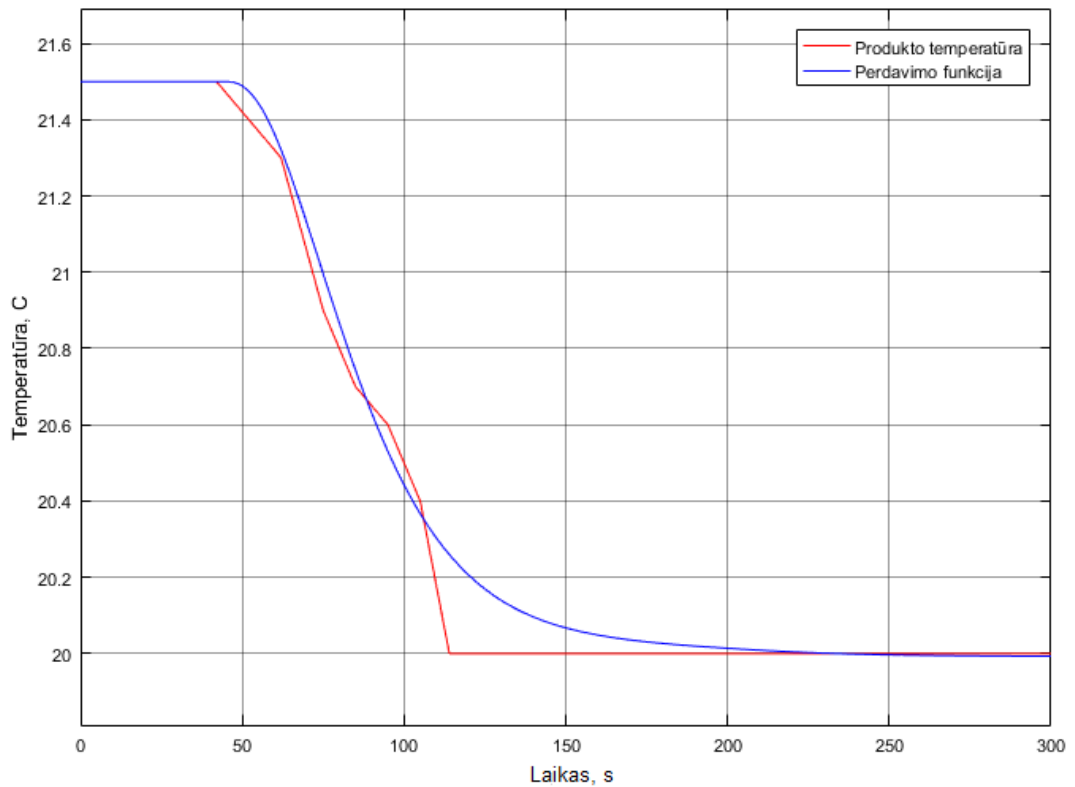


3.3 pav. Oro slėgio duomenų signalas



3.4 pav. Produkto temperatūros duomenų signalas

Bandymo metodo tikslas – aproksimuoti oro slėgio kreivę perdavimo funkcija taip, jog ji kuo geriau atitiktų gautų produkto temperatūros duomenų kreivę. Gautasis optimalus rezultatas pavaizduotas 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Perdavimo funkcija aproksimuota produkto temperatūros kreivė

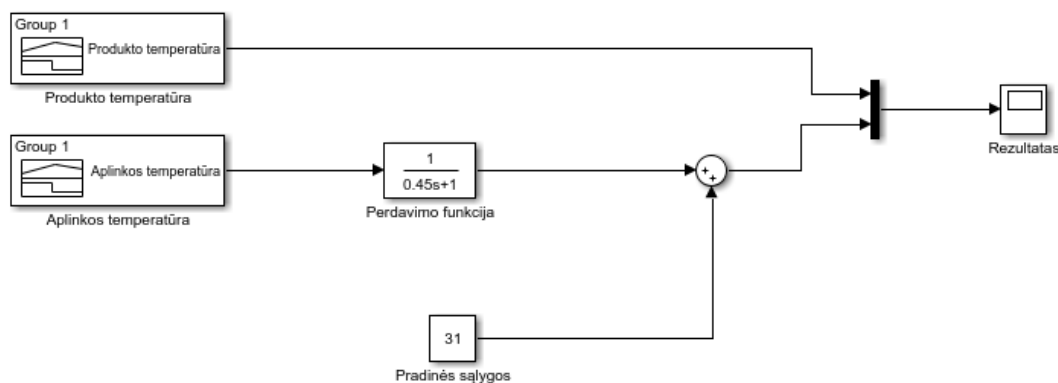
Bandymų metodu gautoji trečios eilės perdavimo funkcija pavaizduota (3.1) lygtyje:

$$W_1 = \frac{-0,343}{(14,5s + 1)^3} e^{-44s};$$

(3.1)

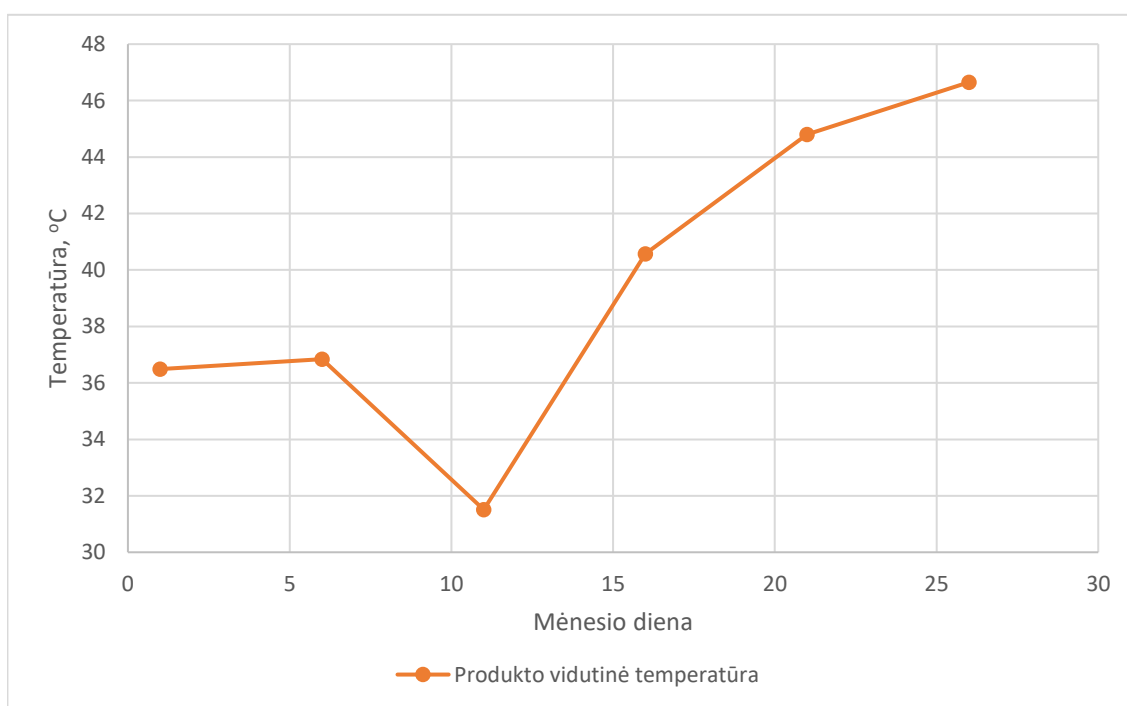
3.3. Produkto temperatūros priklausomybė nuo lauko oro temperatūros

Įtakiai tarp lauko oro temperatūros bei gaunamo produkto temperatūros aprašyti taip pat naudojamas bandymų metodas. Modelis šiai perdavimo funkcijai aproksimuoti pavaizduotas 3.6 paveiksle.

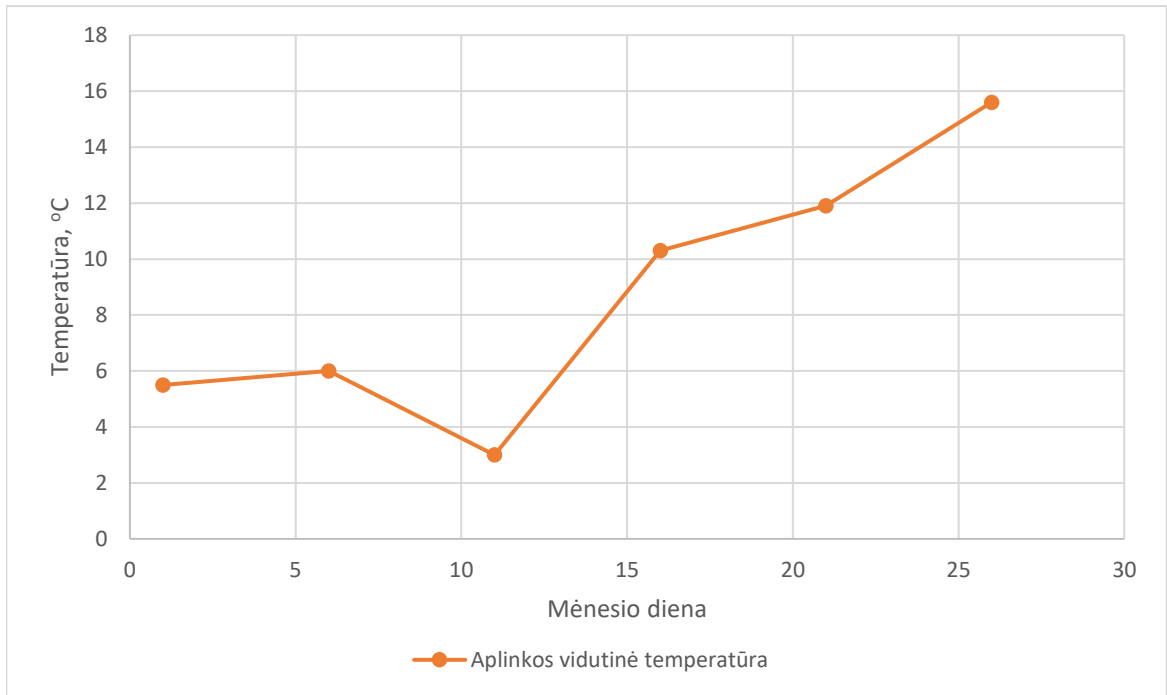


3.6 pav. Produkto temperatūros priklausomybės nuo lauko temperatūros perdavimo funkcijai rasti naudojamas „Matlab / Simulink“ modelis

Toliau, 3.7 ir 3.8 paveiksluose vaizduojami signalų blokų parametrai, kuriuose naudojami gautieji duomenys apie aplinkos temperatūros pokytį 2019m. balandžio mėnesį bei produkto temperatūros pokytį tuo pačiu metu:

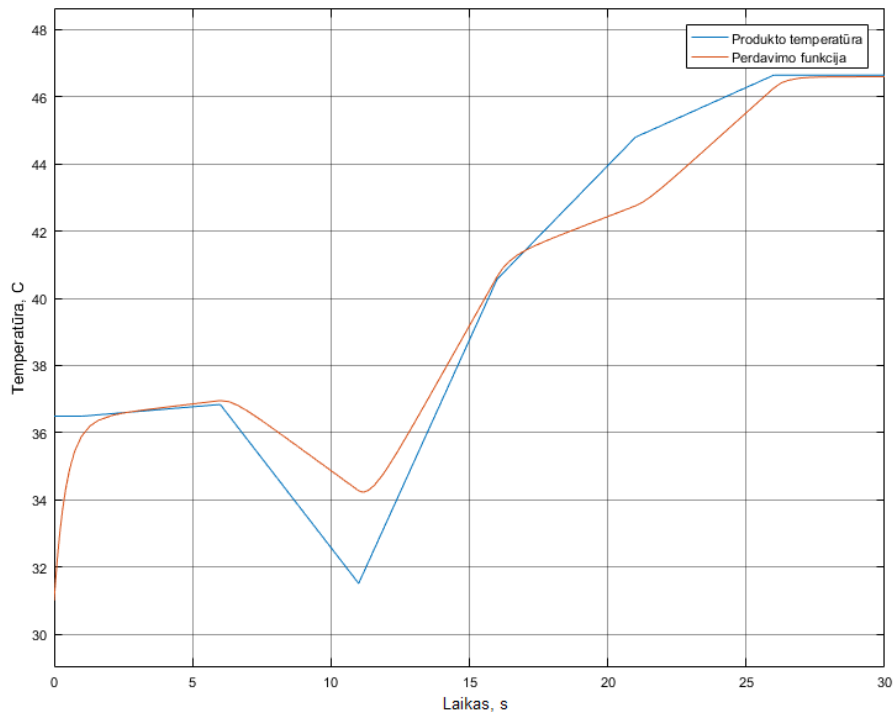


3.7 pav. Produkto temperatūros kitimas 2019m. balandžio mėn.



3.8 pav. Aplinkos temperatūros kitimas 2019m. balandžio mėn.

Gautas optimalus rezultatas pavaizduotas 3.9 paveiksle:



3.9 pav. Perdavimo funkcija aproksimuota produkto temperatūros kreivė

Bandymų metodu gautoji perdavimo funkcija pavaizduota (3.2) išraiškoje:

$$W_2 = \frac{1}{0,45s + 1};$$

(3.2)

3.4. Oro slėgio priklausomybė nuo ventiliatoriaus elektros variklio apsukų

Kadangi granuliacijos procese naudojamas oro slėgio parametras, o projektuojama valdymo sistema keičia ventiliatoriaus elektros variklio apsukas, todėl reikalinga perdavimo funkcija, identifikuojanti kaip keičiasi paduodamo granuliacijai oro slėgis nuo poz.23 ventiliatoriaus elektros variklio apsukų. Šiai perdavimo funkcijai identifikuoti nėra galimybių dėl nepetraukiamo gamybinio proceso, todėl nuspręsta ją skaičiuoti naudojant poz.23 ventiliatoriaus elektros variklio parametrus bei apskaičiuojant vamzdyno, kuriuo tiekiamas oras, tūrį. Vamzdyno schema pavaizduota 3.10 paveiksle.



3.10 pav. Ventiliatoriaus poz. 23/2 ortakio schema [1]

Kadangi slėgio jutiklis įmontuotas ne pačiame ortakio gale, ortakio tūris skaičiuojamas nuo ventiliatoriaus iki jutiklio. Ortakio skersmuo $d = 3,25$ m, todėl jo skerspjūvio plotas $S_{ortakio}$ lygus:

$$S_{ortakio} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 3,1428 * \left(\frac{3,25}{2}\right)^2 = 3,1428 * 2,6406 = 8,296m^2; \quad (3.3)$$

Ortakio nuo ventiliatoriaus iki slėgio jutiklio ilgis lygus $L = 24$ m. Ortakio tūris $V_{ortakio}$ lygus:

$$V_{ortakio} = S * L = 8,296 * 24 = 199,1m^3; \quad (3.4)$$

Perdavimo funkcija, skirta aprašyti paduodamo granuliacijai oro slėgio pokytį nuo ventiliatoriaus poz.23 elektros variklio apsukų, aprašoma (3.5) formule:

$$W = \frac{K}{Ts + 1}; \quad (3.5)$$

Čia K – stiprinimo koeficientas;

T – laiko pastovioji.

Žinant perdavimo funkcijos struktūrą, reikia surasti stiprinimo koeficientą K bei laiko pastoviąją T . Šiuo atveju stiprinimo koeficientas priklauso nuo oro slėgio ortakyje bei ventiliatoriaus poz.23 elektros variklio apsukų, todėl iš elektros variklio pasenaudojus nurodytą greitį bei iš proceso

parametrų užfiksavus vidutinį slėgį tuo metu, atliekami skaičiavimai gauti perdavimo funkcijos stiprinimo koeficientą K . Jei:

$$P = 3,8 \text{ [kPa]};$$

$$N = 748 \left[\frac{\text{aps}}{\text{min}} \right] = 78,33 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right];$$

Tai:

$$K = \frac{P \text{ [Pa]}}{N \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]} = \frac{3,8}{78,33} = 0,0485 \frac{\text{Pa}}{\text{rad/s}};$$

(3.6)

Laiko pastoviajai T apskaičiuoti reikalingas ventiliatoriaus nominalus oro srautas Q , kuris aprašytas technologinėje ventiliatoriaus kortelėje, bei anksčiau apskaičiuotas ortakio tūris V_{ortakio} , siekiant įvertinti kiek laiko sistema užtruks, kol pasieks nustatytą oro slėgį. Jei:

$$Q = 500000 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = 138,88 \text{ [m}^3/\text{s]};$$

$$V_{\text{ortakio}} = 199,1 \text{ [m}^3\text{]};$$

Tai:

$$T = \frac{V_{\text{ortakio}} \text{ [m}^3\text{]}}{Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = \frac{199,1}{138,88} = 1,4336 \text{ s};$$

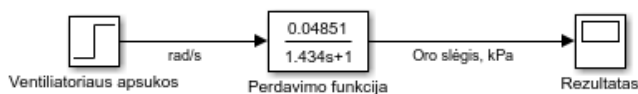
(3.7)

Apskaičiavus šias perdavimo funkcijos dedamąsias, paduodamo granuliacijai oro slėgio pokytį nuo ventiliatoriaus poz.23 elektros variklio apsukų aprašanti perdavimo funkcija pavaizduota (3.8) formulėje:

$$W_{NP} = \frac{0,0485}{1,434s + 1};$$

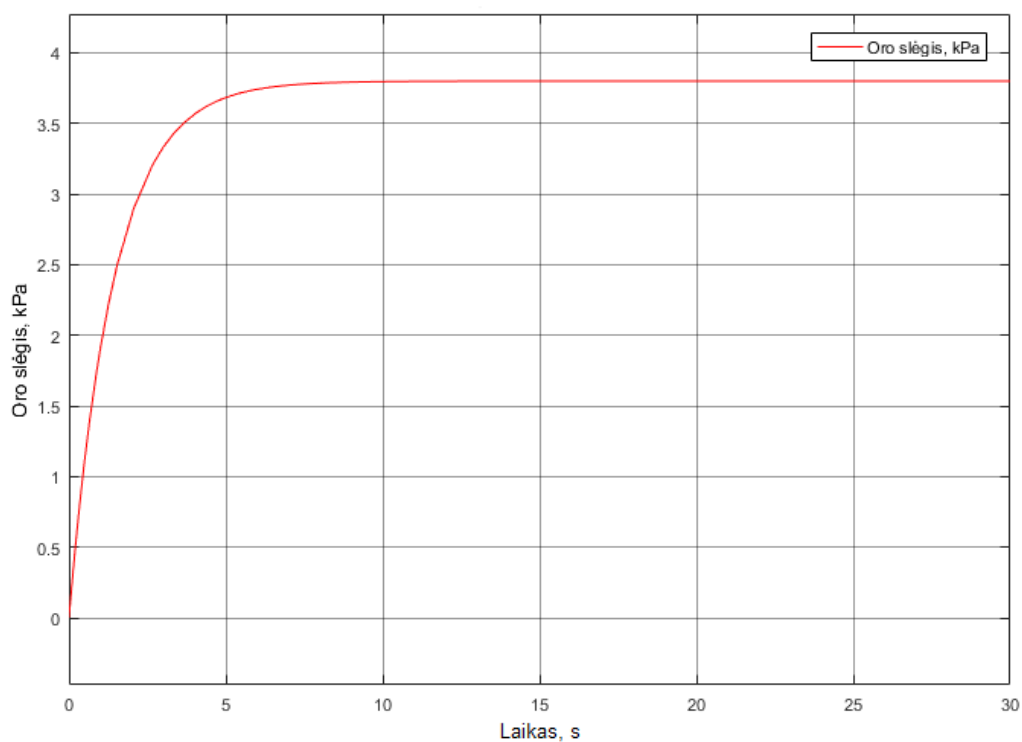
(3.8)

Modelis perdavimo funkcijai tikrinti „*Matlab / Simulink*“ pakete pavaizduotas 3.11 paveiksle.



3.11 pav. Paduodamo granuliacijai oro slėgio pokytį nuo ventiliatoriaus poz.23 elektros variklio apsukų aprašančios perdavimo funkcijos modelis „*Matlab / Simulink*“ aplinkoje

„Step“ bloke įrašyta vertė lygi 78,33 rad/s. Iš rezultatų, pavaizduotų 3.12 paveiksle, galima teigti, jog perdavimo funkcija nustatyta tiksliai, nes oro slėgis modeliavimo metu atitinka realų, ventiliatoriaus poz.23 technologinėje kortelėje aprašytą oro slėgį.



3.12 pav. Perdavimo funkcijos modeliavimo rezultatas

4. Sistemos modelio realizavimas „Matlab / Simulink“ aplinkoje

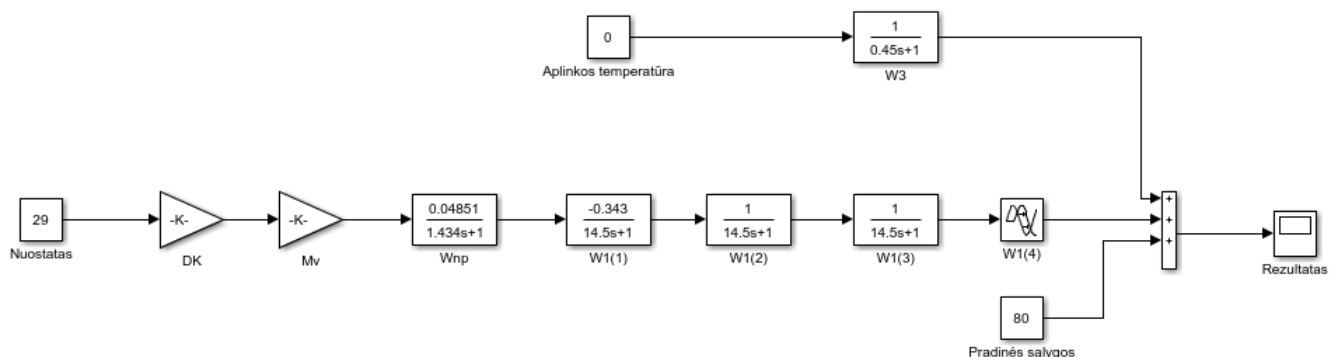
Identifikavus objekto perdavimo funkcijas, reikia realizuoti trūkstantas dažnio keitiklio bei elektros variklio perdavimo funkcijas. Dažnio keitiklio perdavimo funkcija, atsižvelgiant į tai, jog modeliavimui pasirinktas elektros variklio valdymo principas atitinka tiesinę U/f priklausomybę, jam realizuoti naudojamas „gain“ blokas ir stiprinimo koeficientas lygus išėjimo dažnio bei elektros variklio nominalios įtampos santykiui:

$$DK = \frac{f [Hz]}{U [V]} = \frac{50}{6000} = 8,33 \cdot 10^{-3}; \quad (4.1)$$

Elektros variklio perdavimo koeficientas taip pat realizuojamas „gain“ bloku, ir lygus nominalaus kampinio greičio bei dažnio santykiui:

$$M_V = \frac{\omega [rad/s]}{f [Hz]} = \frac{78,33}{50} = 1,566; \quad (4.2)$$

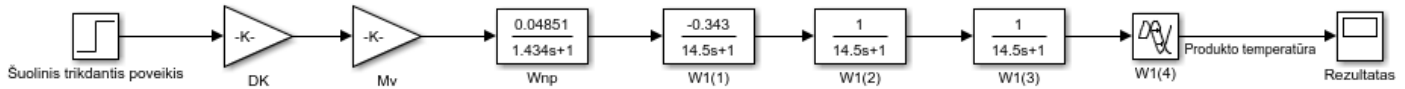
Apskaičiavus šias priklausomybes bei identifikavus anksčiau minėtas objekto perdavimo funkcijas, galima „Matlab / Simulink“ aplinkoje sudaryti modelį be valdymo sistemos, esant eksperimentų, skirtų identifikuoti objekto perdavimo funkcijas, atlikimo metu vyravusiomis sąlygomis:



4.1 pav. Modelis be valdymo sistemos, realizuotas „Matlab / Simulink“ aplinkoje

4.1. Objekto reakcijos į šuolinį trikdį aproksimavimas pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija

Norint sukurti grįžtamojo ryšio reguliatorių bei suderinti jo parametrus, reikia aproksimuoti objekto reakciją į šuolinį nuostato pokytį pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcija. Sistemos modelis šiam tikslui įgyvendinti pavaizduotas 4.2 pav.



4.2 pav. Modelis, naudojamas objekto reakcijos į trikdantį šolį identifikavimui

Įvedus į sistemą trikdį laiko momentu $t = 0$ s, kai nuostatas kinta nuo 0 °C iki 30 °C, produkto temperatūra reaguoja atvirkščiai – žemėja. Dėl šios priežasties galima teigti, jog pirmosios eilės perdavimo funkcijos stiprinimo koeficientas bus neigiamas. Identifikavimo procedūra atliekama grafiniu C. L. Smith'o metodu, nustatant tris pagrindinius kreivės taškus: $y(\infty)$, $y(t_1)$ ir $y(t_2)$. Jei:

$$\Delta u = 30;$$

Tai gautieji duomenys:

$$y(\infty) = -6,5 \cdot 10^{-3};$$

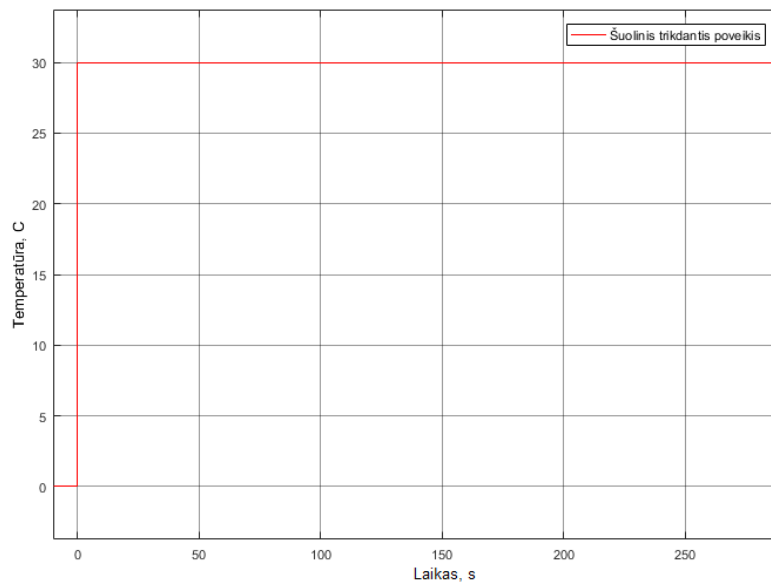
$$y(t_1) = 0,283 y(\infty) = -1,84 \cdot 10^{-3};$$

$$t_1 = 71,767 \text{ s};$$

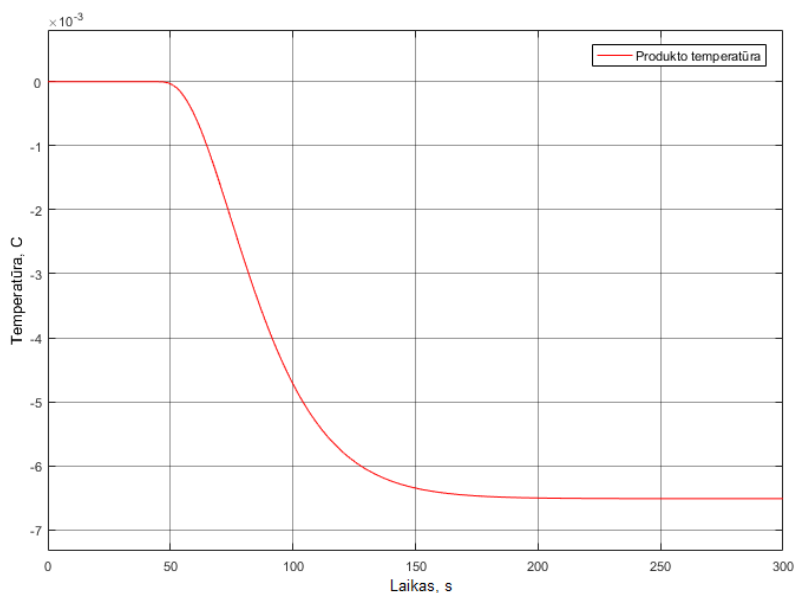
$$y(t_2) = 0,632 y(\infty) = -4,11 \cdot 10^{-3};$$

$$t_2 = 91,982 \text{ s};$$

Šuolinės reakcijos eksperimento rezultatai pavaizduoti 4.3 paveiksle.



a



b

4.3 pav. Šuolinės reakcijos eksperimento rezultatai: a – šuolinio trikdančio poveikio signalas, b – sistemos reakcija į šuolinį trikdantį poveikį

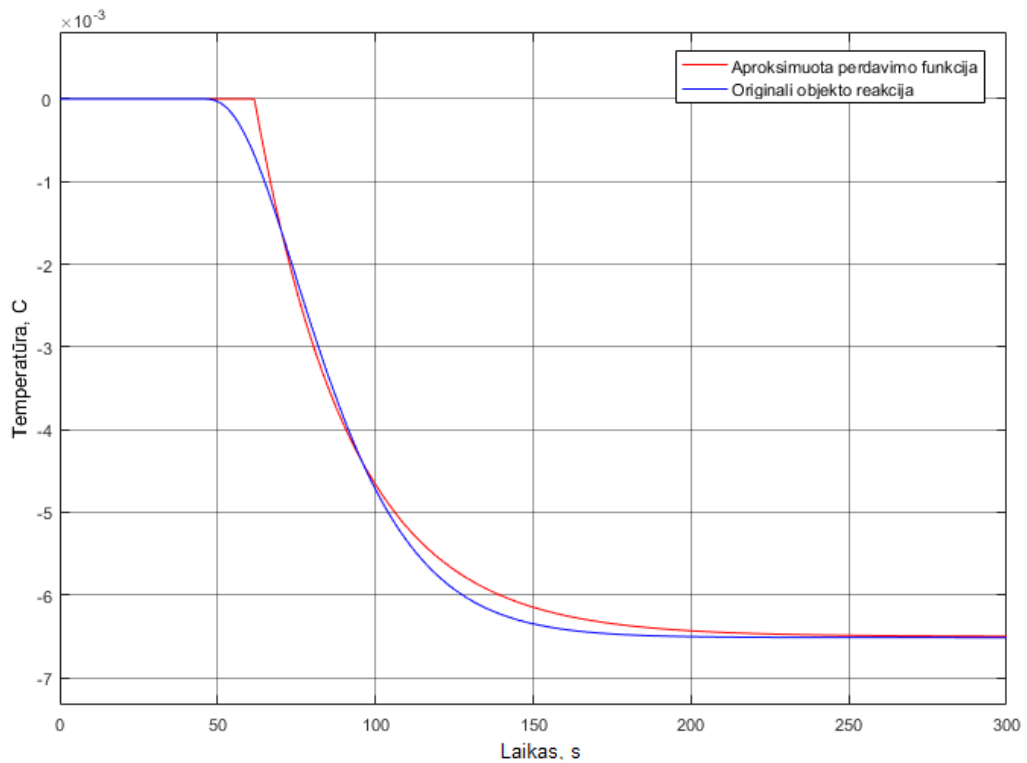
Su gautaisias reakcijos kreivės taškais apskaičiuojami perdavimo funkcijos stiprinimo koeficientas K_{pr} , laiko pastovioji T_{pr} ir vėlavimo trukmė τ_{pr} :

$$K_{pr} = \frac{y(\infty)}{\Delta u} = \frac{-6,5 \cdot 10^{-3}}{30} = -2,167 \cdot 10^{-4}; \quad (4.3)$$

$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) = \frac{3}{2}(91,982 - 71,767) = 30,323; \quad (4.4)$$

$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr} = 91,982 - 30,323 = 61,659; \quad (4.5)$$

Grafiniu C. L. Smith'o metodu gautų aproksimavimo rezultatų palyginimas su originalia reakcijos kreive į identišką šuolinį trikdantį poveikį pavaizduotas 4.4 paveiksle.



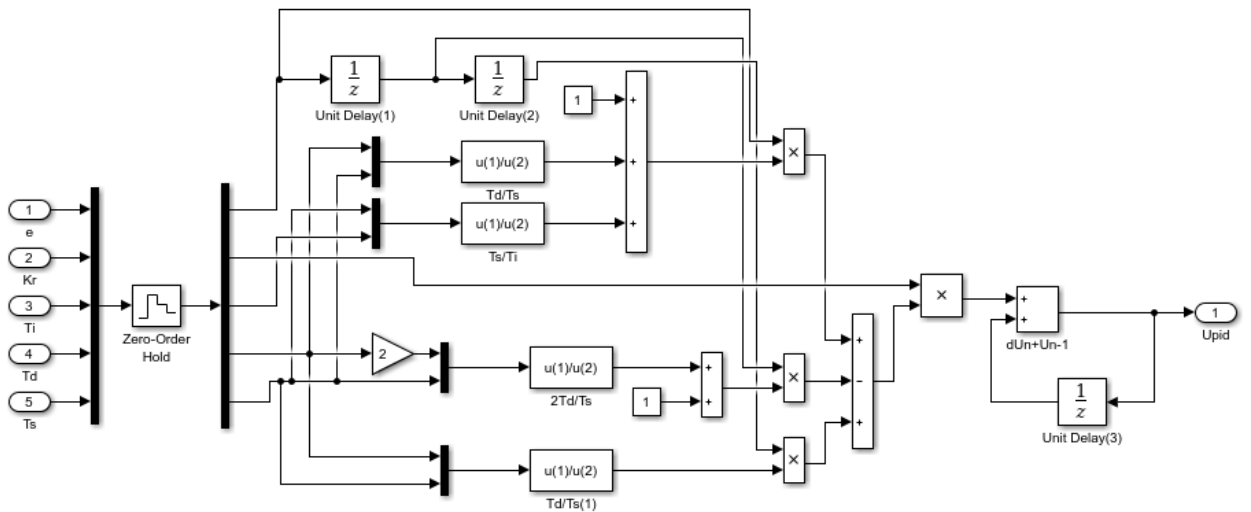
4.4 pav. Aproksimuotos bei originalios perdavimo funkcijos reakcijų palyginimas

4.2. Grįžtamojo ryšio reguliatoriaus derinimas ir tyrimas

Projektuojant grįžtamojo ryšio reguliatoriaus algoritimą, reikia atsižvelgti į tai, kokios konfigūracijos jis turėtų būti. Labiausiai tikėtina, jog valdymo sistema bus realizuojama programuojamu loginiu valdikliu, todėl skaitmeninis reguliatoriaus algoritmas geriausiai atitiktų šią konfigūraciją. Kadangi objektas yra inertiškas ir gali būti sudėtingai valdomas [12], modeliavimui pasirinktas būtent pokyčių PID reguliatoriaus algoritmas [14], pavaizduotas (4.6) formulėje:

$$\Delta u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T_s} + \frac{T_s}{T_i} \right) e_n - \left(1 + \frac{2T_d}{T_s} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T_s} e_{n-2} \right]; \quad (4.6)$$

„Matlab / Simulink“ aplinkoje „*subsystem*“ bloke realizuotas pokyčių PID reguliatoriaus algoritmas pavaizduotas 4.5 pav.



4.5 pav. Diskretinio pokyčių PID regulatoriaus realizavimas „Matlab / Simulink“ aplinkoje

Grįžtamojo ryšio regulatoriaus parametrus derinti pasirinktas minimalios integruotos absoliučiosios paklaidos su laiko svoriniu koeficientu (ITAE) optimizavimo kriterijus, nes F.G. Martins [15] darbe pateikiama, jog šis metodas nesunkiai pritaikomas daugelyje įvairios dinamikos procesų bei jo rezultatai geresni nei Ziegler-Nichols metodu suderinto regulatoriaus. Derinant ITAE kriterijumi atsižvelgiama ne tik į paklaidą, bet ir į laiko svorinį koeficientą, todėl reguliatorius padidina pereinamojo proceso greitaveiką [7]. Matematiškai pateikta ITAE optimizavimo kriterijaus (4.7) formulė:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt; \quad (4.7)$$

Atliekami regulatoriaus parametrų skaičiavimai dviem skirtingais atvejais: nuostato ir trikdžio reakcijos tipais.

Skaičiavimai nuostato reakcijos tipui:

$$K_{pr} = -2,167 \cdot 10^{-4};$$

$$T_{pr} = 30,323;$$

$$\tau_{pr} = 61,659;$$

$$K_r = \frac{0,965}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,855} = \frac{0,965}{-2,167 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{30,323}{61,659} \right)^{0,855} = -2428; \quad (4.8)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{[0,796 - 0,147 \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)]} = \frac{30,323}{[0,796 - 0,147 \left(\frac{61,659}{30,323} \right)]} = 61,001; \quad (4.9)$$

$$T_d = 0,308 * T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,929} = 0,308 * 30,323 \left(\frac{61,659}{30,323} \right)^{0,929} = 18,058; \quad (4.10)$$

Skaičiavimai trikdžio reakcijos tipui:

$$K_r = \frac{1,357}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947} = \frac{1,357}{-2,167 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{30,323}{61,659} \right)^{0,947} = -3198; \quad (4.11)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738} = \frac{30,323}{0,842} \left(\frac{61,659}{30,323} \right)^{0,738} = 60,804; \quad (4.12)$$

$$T_d = 0,381 * T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995} = 0,381 * 30,323 \left(\frac{61,659}{30,323} \right)^{0,995} = 23,409; \quad (4.13)$$

4.1 lentelė. Grįžtamojo ryšio reguliatorių parametų palyginimas

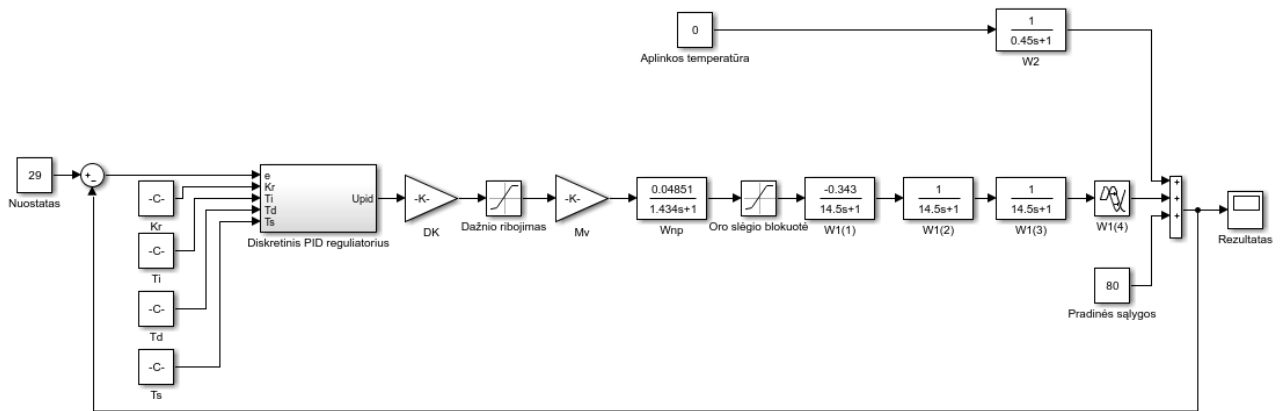
Regulatoriaus tipas	PID nuostato reakcijos	PID trikdžio reakcijos
Dedamoji		
K_r	-2428	-3198
T_i	61,001	60,804
T_d	18,058	23,409

4.1 lentelėje matyti, jog nuostato reakcijos reguliatorius turi gerokai mažesnę neigiamą stiprinimo koeficientą bei truputį mažesnę diferencijavimo grandies dedamąją negu trikdžio reakcijos reguliatorius, tačiau integravimo grandies dedamosios abiejų tipų reguliatoriuose yra labai panašios vertės. Prieš atliekant šių reguliatorių tyrimą taip pat reikia parinkti diskretizavimo žingsnį T_s pagal objekto dinamiką. Kadangi objekto vėlavimo trukmė τ_{pr} ir laiko pastovioji T_{pr} yra tos pačios eilės, diskretizavimo žingsnio išraiška yra lygi:

$$T_s = \min \begin{cases} 0,1 * T_{pr}; \\ 0,1 * \tau_{pr}; \end{cases} \quad (4.14)$$

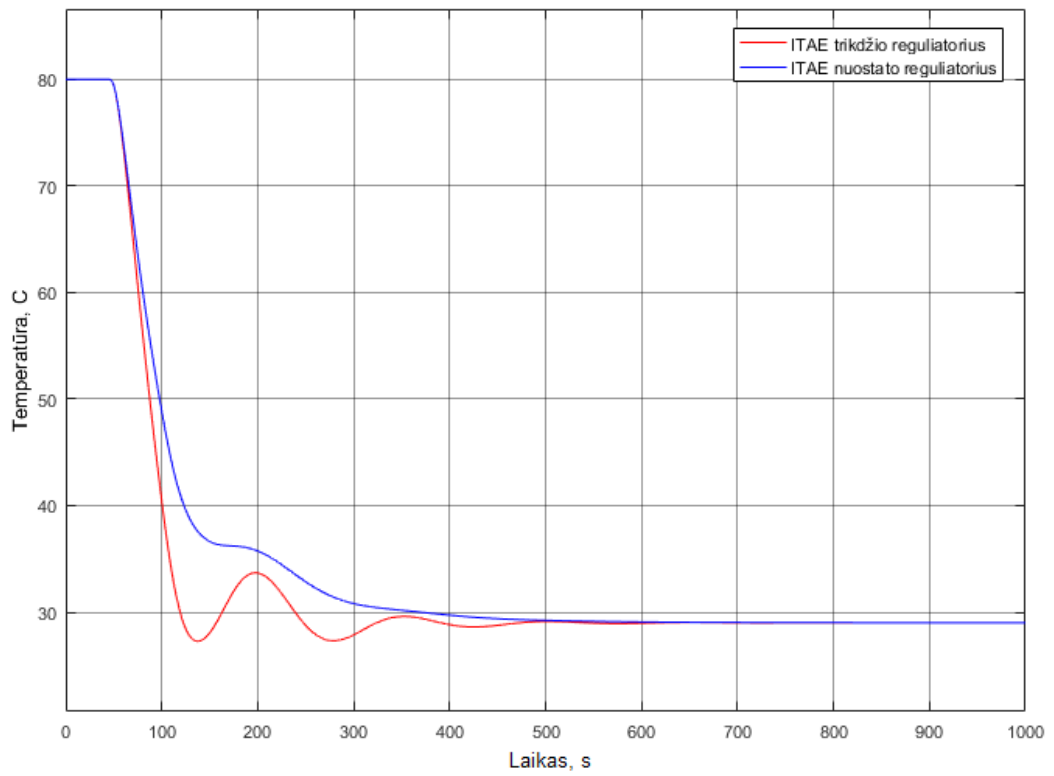
$$T_s = 0,1 * T_{pr} \approx 3 [s]; \quad (4.15)$$

Žinant diskretizavimo žingsnį ir norint įvertinti, kuris reguliatorius labiau tinkamas šiam technologiniam procesui valdyti, reikia atlikti abiejų reguliatorių kokybinių kriterijų analizę pereinamojo proceso metu.

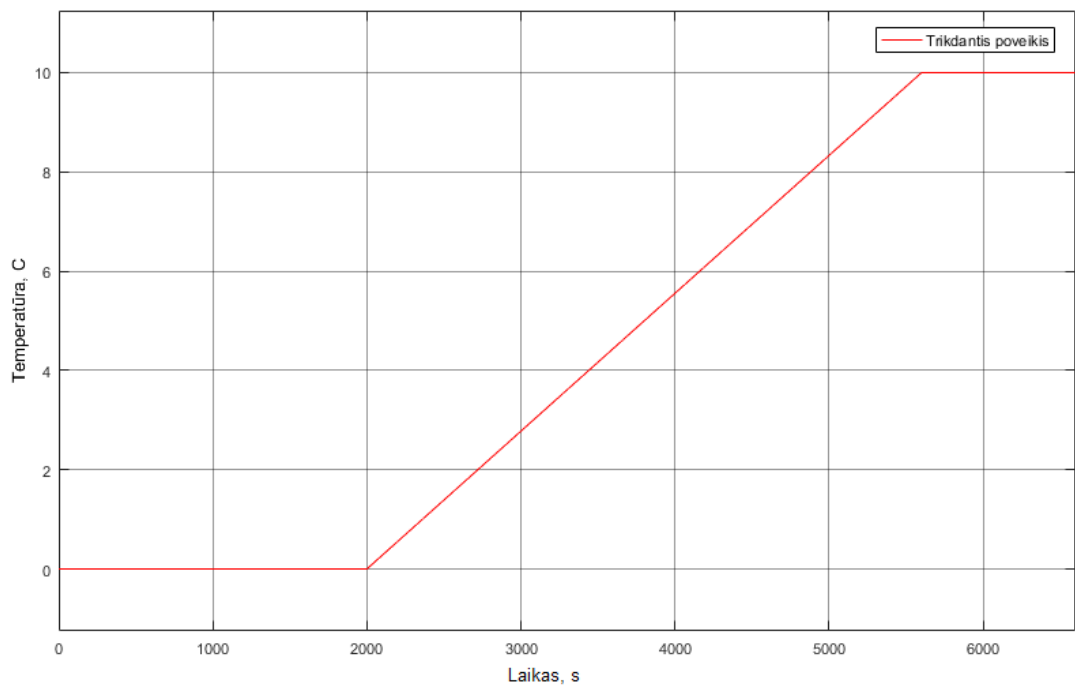


4.6 pav. Tyrimui naudojamas sistemos modelis su diskretiniu reguliatoriumi „*Matlab / Simulink*“ aplinkoje

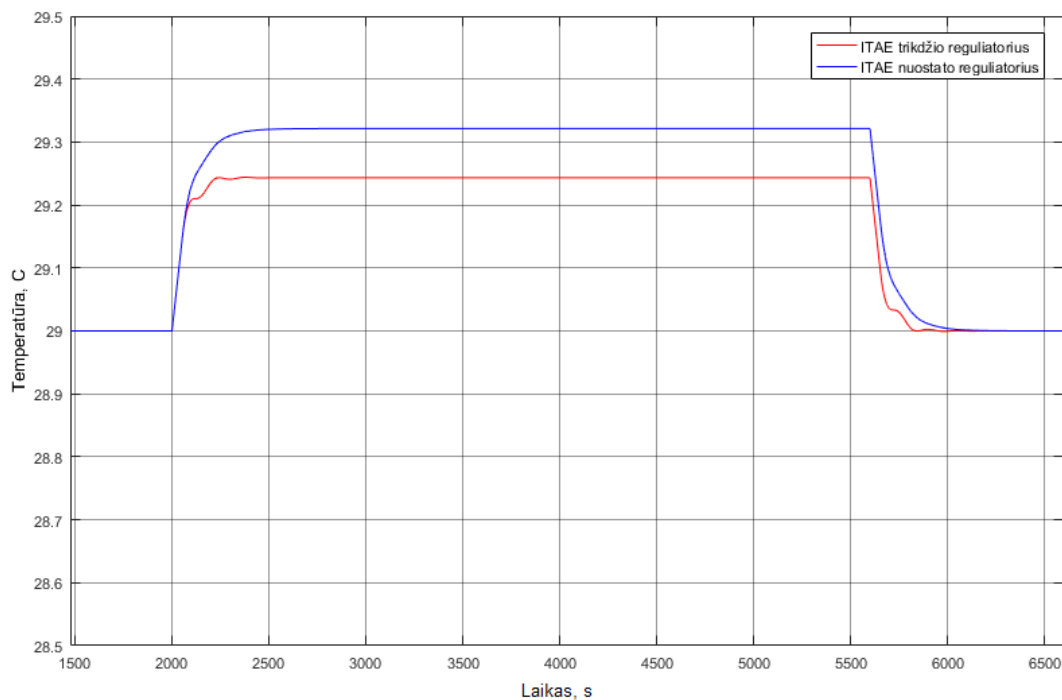
Pirmiausia stebimas objekto pereinamasis procesas nuostato signalui su abiem reguliatoriais. Iš 4.7 paveikslėly matyti, jog trikdžio reakcijos reguliatorius dėl didesnio stiprinimo koeficiento turi spartesnę greitaveiką negu nuostato reakcijos reguliatorius, tačiau reakcijos kreivėje yra perreguliavimas. Technologiniam procesui nuostato signalas turi mažesnę įtaką negu trikdžio signalas, nes nuostatas yra nekintantis, o pats gamybos procesas yra nepertraukiamas, t. y. stabdomas tik planinių remontų metu. Dėl šių priežasčių atliekamas reguliatorių tyrimas sistemoje vyraujant trikdžiui priimtomis ekstremumo sąlygomis, t. y. 10 laipsnių temperatūros pokyčiui nuo 0 °C iki 10 °C per vieną valandą, kai sistemoje pereinamasis procesas yra nusistovėjęs. Trikdančio poveikio signalas pavaizduotas 4.8 paveiksle, modeliavimo rezultatai pavaizduoti 4.9 pav.



4.7 pav. Nuostato ir trikdžio reguliatorių reakcijų į nuostato signalą palyginimas



4.8 pav. Trikdančio poveikio signalas, naudojamas tyrimui atlikti



4.9 pav. Nuostato ir trikdžio reguliatorių reakcijos į lauko temperatūros trikdžio poveikį palyginimas

Iš 4.9 pav. rezultatų matyti, jog abu reguliatoriai statinės paklaidos neeliminuoja, tačiau ši paklaida ITAE metodu pagrįsto trikdžio poveikio reguliatoriaus yra mažesnė, nei tuo pačiu metodu pagrįsto nuostato poveikio reguliatoriaus. Todėl tolimesniuose tyrimuose modeliavimo metu naudojamas ITAE kriterijaus trikdžio poveikiui suderintas reguliatorius.

5. Tiesioginio ryšio regulatoriaus (kompensatoriaus) derinimas ir tyrimas

Tiesioginio ryšio regulatorių pagrindinis privalumas yra galimybė kompensuoti trikdantį signalą, jam dar nepaveikus proceso išėjimo. Todėl, šiuo atveju, matuojant lauko oro temperatūrą, su kompensatoriumi galima eliminuoti granulių temperatūros paklaidą, atsirandančią keičiantis lauko oro temperatūrai. Žinant trikdančio poveikio perdavimo funkciją, kompensavimo grandis aprašoma pagal (5.1) formulę:

$$W_k(s) = -\frac{W_d(s)}{W_{pr}(s)}; \quad (5.1)$$

Čia W_k – kompensatoriaus perdavimo funkcija;

W_d – trikdančio poveikio perdavimo funkcija;

W_{pr} – valdomo proceso perdavimo funkcija.

Kompensatoriaus įtakos trikdančio poveikio eliminavimo tyrimui naudojami trys tiesioginio ryšio regulatoriaus variantai:

- stiprinimo koeficientas;
- spartinimo / vėlinimo grandis;
- spartinimo / vėlinimo grandis su paankstinimu, išreiškiamu naudojant „Pade“ aproksimaciją.

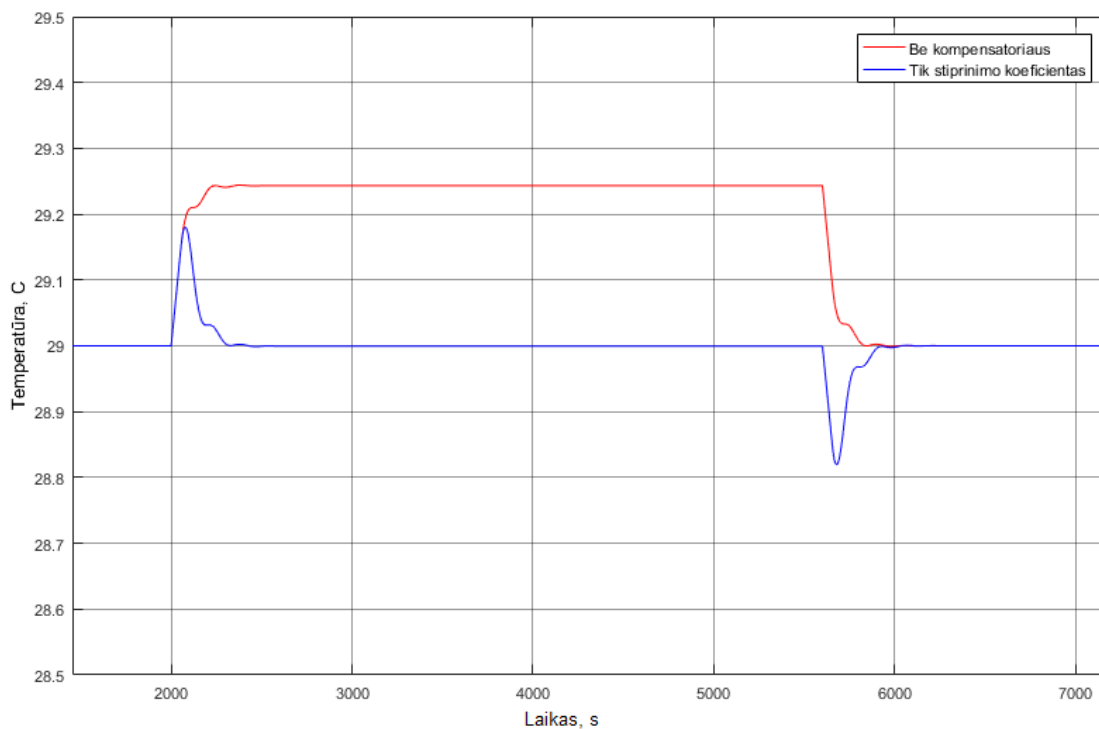
Pirmuoju atveju iš pilnosios kompensatoriaus perdavimo funkcijos naudojamas tik stiprinimo koeficientas. Jei pilnoji perdavimo funkcijos forma yra:

$$W_k(s) = -\frac{-\left(\frac{1}{0,45s + 1}\right)}{\left(\frac{-0.0002167}{30.323s + 1}\right) e^{-61,659s}} = \frac{4614,675 * e^{61,659s} * (30,323s + 1)}{0,45s + 1}; \quad (5.2)$$

Tai kompensatoriaus, realizuojamo tik su stiprinimo koeficientu perdavimo funkcija yra:

$$W_k(s) = 4614,675; \quad (5.3)$$

Jis „*Matlab / Simulink*“ aplinkoje realizuojamas „*gain*“ bloku, ir jo reakcija į anksčiau minėtą trikdantį lauko oro temperatūros signalą (10 laipsnių temperatūros pokytį nuo 0 °C iki 10 °C per vieną valandą, kai sistemoje pereinamasis procesas yra nusistovėjęs) pavaizduota 5.1 paveiksle.

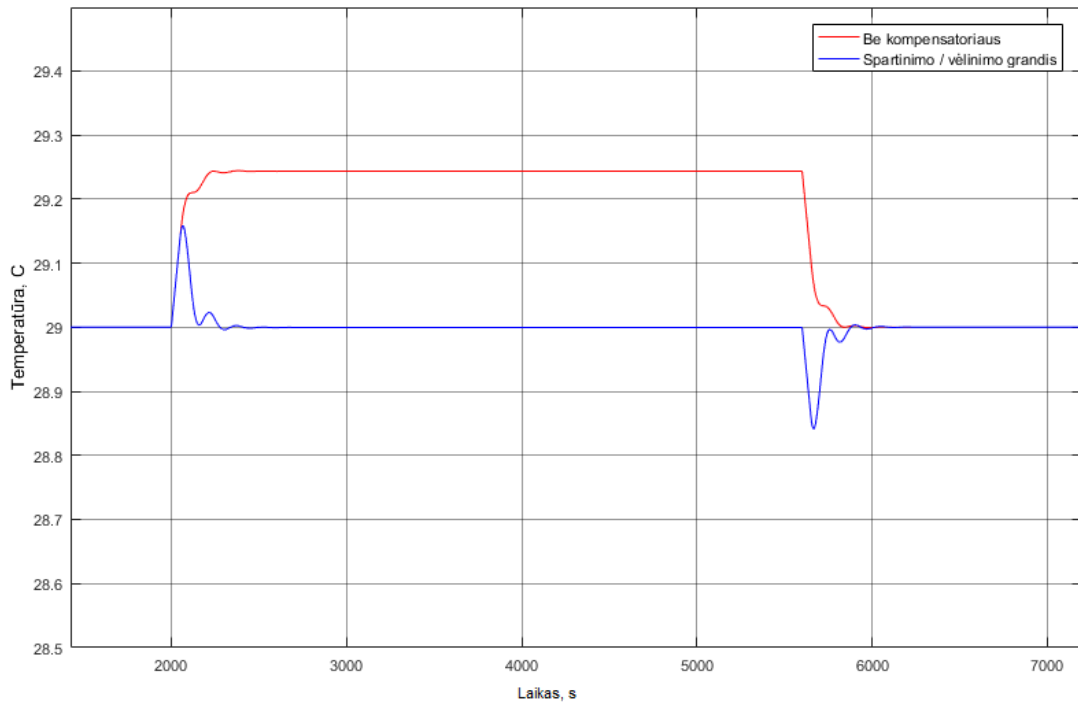


5.1 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu stiprinimo koeficientu, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija

Antruoju atveju, kai kompensatoriui realizuoti yra naudojama spartinimo / vėlinimo grandis, jo išraiška pavaizduota (5.4) formulėje:

$$W_k(s) = \frac{4614,675 * (30,323s + 1)}{0,45s + 1}; \quad (5.4)$$

„Matlab / Simulink“ aplinkoje jis realizuojamas „gain“ ir „transfer function“ blokais. Jo reakcija į trikdį pavaizduota 5.2 pav.

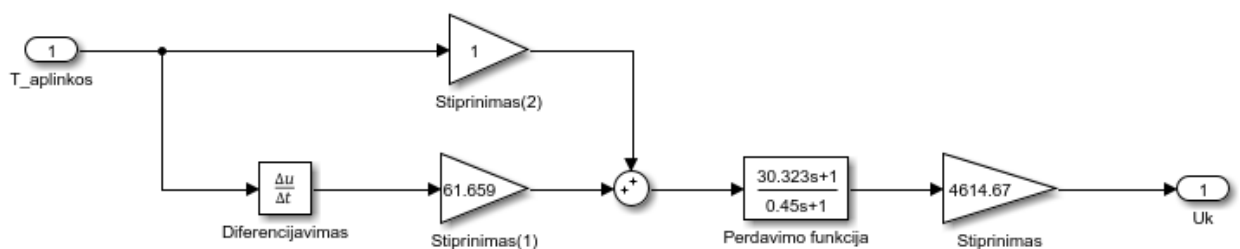


5.2 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu spartinimo / vėlinimo grandimi, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija

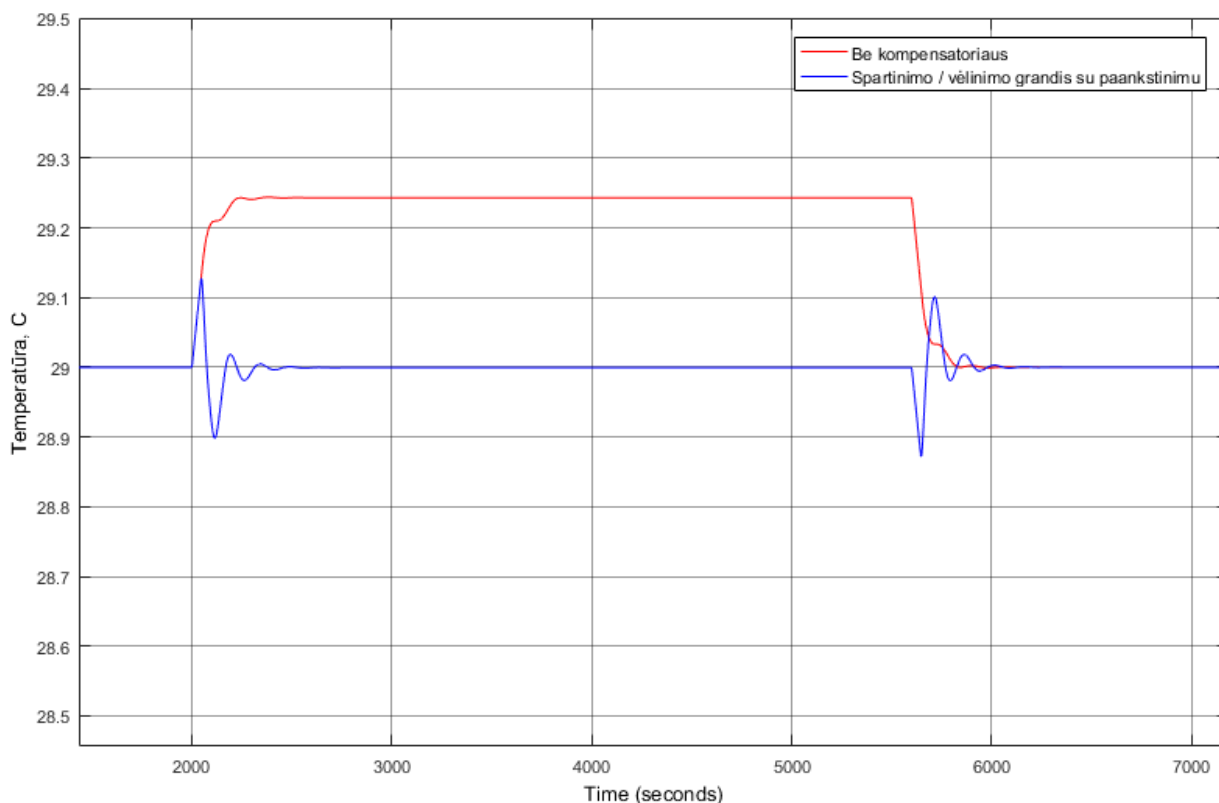
Trečiuoju atveju, kai kompensatoriaus išraiška yra spartinimo / vėlinimo grandis su „Pade“ aproksimacija, pritaikius aproksimaciją, išraiška yra lygi:

$$W_k(s) = \frac{4614,675 * e^{61,659s} * (30,323s + 1)}{0,45s + 1} = \frac{4614,675 * (61,659s + 1) * (30,323s + 1)}{0,45s + 1}; \quad (5.5)$$

Kompensatorius, realizuotas „Matlab / Simulink“ aplinkoje pateiktas 5.3 pav., jo reakcijos į trikdantį poveikį rezultatai pavaizduoti 5.4 pav.



5.3 pav. Tiesioginio ryšio regulatoriaus (kompensatoriaus) struktūrinė schema „Matlab / Simulink“ aplinkoje

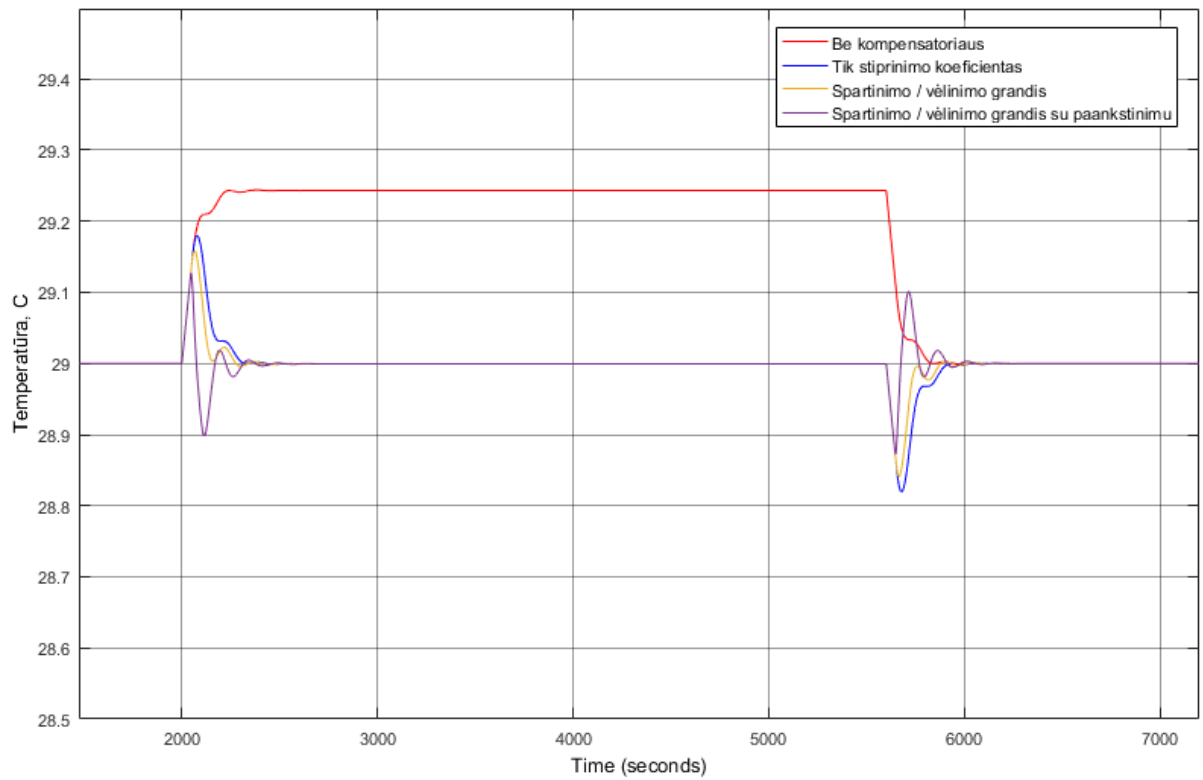


5.4 pav. Sistemos su kompensatoriumi, realizuotu spartinimo / vėlinimo grandimi su paankstinimu, reakcijos į trikdantį poveikį palyginimas su sistemos be kompensatoriaus reakcija

Turint visų tiesioginio ryšio reguliatorių reakcijas į trikdantį poveikį, galima palyginti jų visų reakcijų skirtumus. Kompensatorių perdavimo funkcijos pavaizduotos 5.1 lentelėje. Kaip matyti 5.5 paveiksle, visų trijų tipų kompensatoriai eliminuoja statinę paklaidą trikdžio signalo poveikio metu, tačiau geriausiai trikdantį poveikį kompensuoja, atsižvelgiant į tai, jog dinamika skirtingais metų laikais gali skirtis, būtent trečiasis – spartinimo / vėlinimo grandies su paankstinimu, išreiškiamu naudojant „Pade“ aproksimaciją – kompensatorius.

5.1 lentelė. Skirtingų tipų tiesioginio ryšio reguliatorių perdavimo funkcijų palyginimas

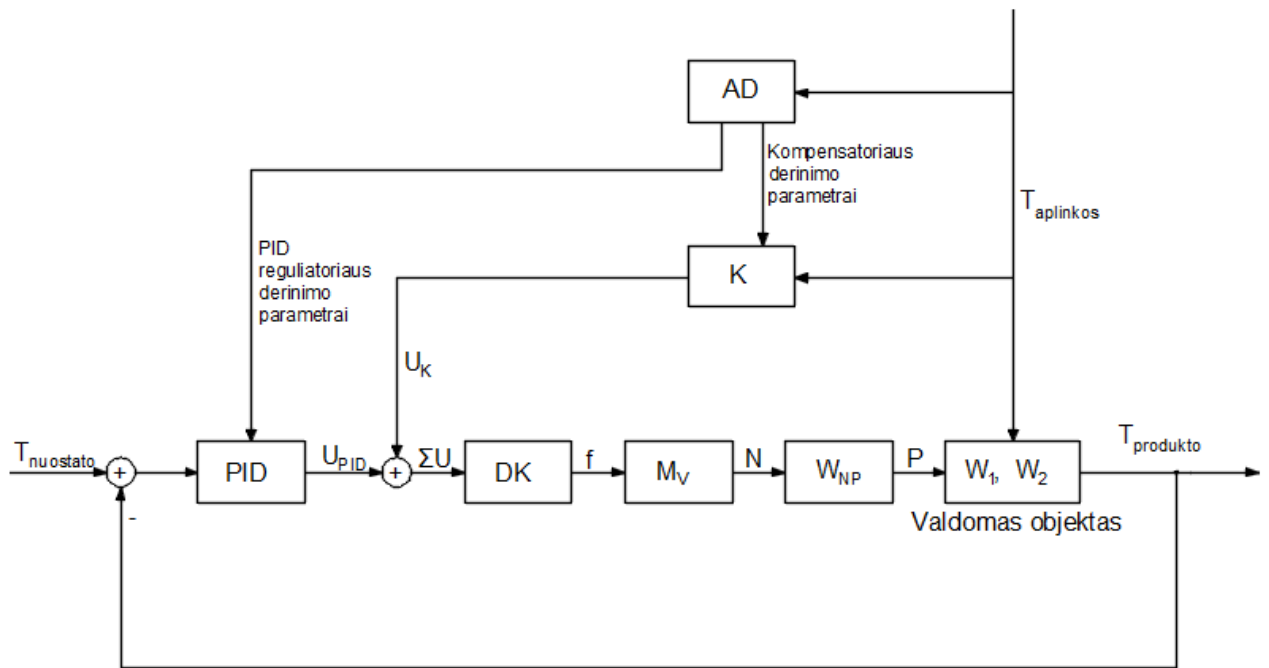
Kompensatoriaus realizavimo būdas	Perdavimo funkcija
Stiprinimo koeficientas	$W_k(s) = 4614,675$
Spartinimo / vėlinimo grandis	$W_k(s) = \frac{4614,675 * (30,323s + 1)}{0,45s + 1}$
Spartinimo / vėlinimo grandis su „Pade“ aproksimacija	$W_k(s) = \frac{4614,675 * (61,659s + 1) * (30,323s + 1)}{0,45s + 1}$



5.5 pav. Visų tipų tiesioginio ryšio reguliatorių reakcijos į trikdančio poveikio signalą palyginimas

6. Adaptyvios valdymo sistemos realizavimo galimybių tyrimas

Kadangi amonio nitrato granuliacijos technologiniam procesui naudojamas nevalytas lauko oras, akivaizdu, jog jo temperatūra skirtingais metų laikais ar paros metu kinta. Keičiantis lauko oro temperatūrai kinta ir technologinio proceso dinamika – šiltesnis oras granuliacijos metu prasčiau atvėsina amonio nitrato granules. Atsiradus žymiems lauko oro temperatūros svyravimams būtų racionalu naudoti adaptyvaus valdymo metodiką, kuria galima pakoreguoti reguliatorių derinimo parametrus pagal lauko oro sąlygas. Adaptacijos algoritmo sudarymui siūloma naudoti stiprinimo numatymo (*gain scheduling*) adaptacijos metodiką. Valdymo sistemos struktūrinė schema su adaptacijos algoritmu pavaizduota 6.1 pav.

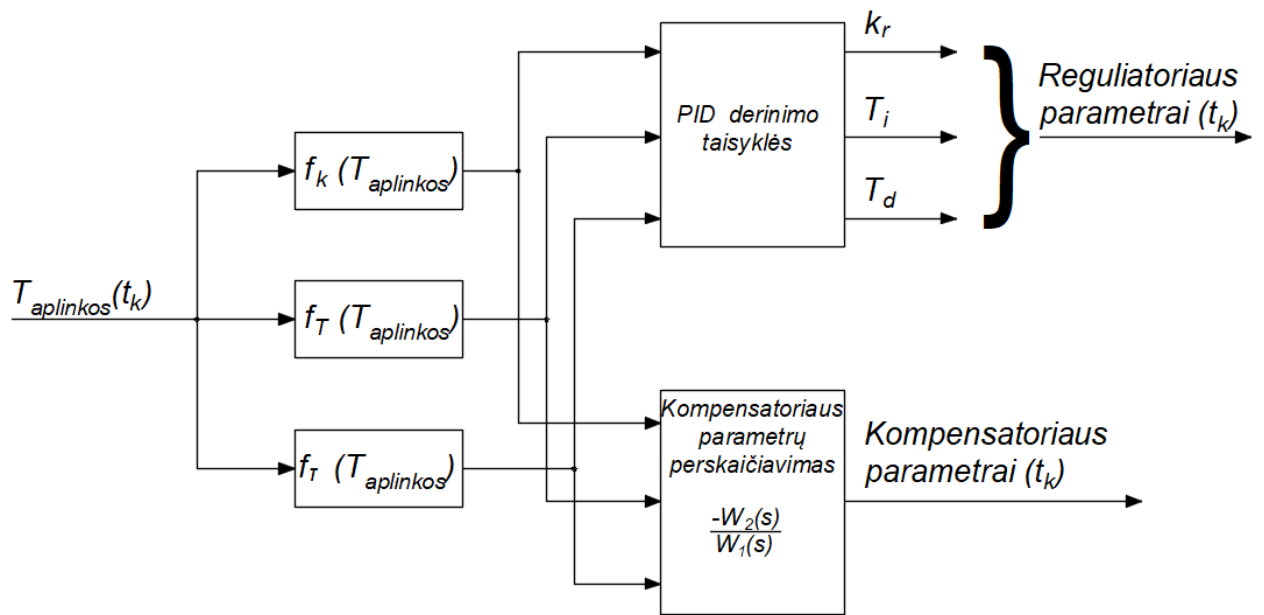


6.1 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema su adaptacijos algoritmu

Adaptacijos algoritmo realizavimui reikia nustatyti valdomo objekto perdavimo funkcijos atstojamųjų dinaminųjų parametrų (stiprinimo koeficiento, laiko pastoviosios, vėlavimo laiko) priklausomybes nuo aplinkos temperatūros:

$$K_{pr} = f_K(T_{aplinkos}), T_{pr} = f_T(T_{aplinkos}), \tau_{pr} = f_\tau(T_{aplinkos}). \quad (6.1)$$

Nustačius priklausomybes, (6.1) PID reguliatoriaus ir kompensatoriaus adaptacija gali būti realizuota kaip pavaizduota pav. 6.2 paveiksle.



6.2 pav. PID reguliatoriaus ir kompensatoriaus adaptyvaus valdymo realizavimo schema

Priklausomybių (6.1) nustatymui reikalingi valdomo proceso pereinamųjų procesų stebėjimo duomenys prie skirtingų aplinkos temperatūrų plačiame temperatūros kitimo diapazone vasaros ir žiemos laikotarpiais. Dėl šiltos šių metų žiemos nebuvo galimybės atlikti aktyvių eksperimentų šiai informacijai gauti, todėl nebuvo praktinės galimybės sudaryti ir iširti aukščiau pateiktą adaptacijos algoritmą.

Išvados

1. Atlikus amonio nitrato gamybos technologinio proceso analizę, buvo nustatyta, kad aktuali technologinio proceso problema atsiranda amonio nitrato granuliacijos etape, kuris tiesiogiai susijęs su produkto kokybe. Kadangi šis technologinio proceso etapas neturi automatinio valdymo sistemos, gamybos metu, priklausomai nuo aplinkos sąlygų, produkto temperatūra svyruoja plačiame diapazone – nuo 0 °C iki 40 °C, nors optimali granuliu temperatūra po granuliacijos yra 29 °C. Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką produkto temperatūros svyravimui, yra lauko oro temperatūra ir granuliacijai tiekiamas oro slėgis.
2. Literatūroje nerasta analogiškų ar labai panašių technologinių procesų valdymo sistemos realizavimo pavyzdžių, tačiau dažniausiai chemijos pramonėje naudojamos valdymo sistemos yra grįžtamojo ryšio, grįžtamojo ryšio su trikdžio kompensavimu bei kaskadinės valdymo sistemos. Atsižvelgiant į tai, jog tiriamojo objekto atveju aplinkos temperatūra proceso kokybę veikia kaip trikdantis poveikis, šiam technologiniam procesui parinkta tiesioginio / grįžtamojo ryšio sistema.
3. Proceso dinaminiams parametrų identifikuoti buvo atliktas aktyvus eksperimentas (produkto temperatūros priklausomybė nuo oro slėgio) ir pasyvus eksperimentas (produkto temperatūros priklausomybė nuo lauko oro temperatūros). Remiantis eksperimentų rezultatais identifikuoti objekto perdavimo funkcijų modeliai, naudojami valdomo proceso modeliavimui „*Matlab / Simulink*“ aplinkoje.
4. Grįžtamojo ryšio PID reguliatoriui buvo parinktos ITAE kriterijaus derinimo taisyklės, nes, pagal objekto dinamiką, šis derinimo kriterijus leidžia gauti gerą reguliavimo kokybę, t. y. reguliavimo laiką, perreguliuojimą bei dinaminę nuokrypą.
5. Ištirti trys tiesioginio ryšio reguliatorių tipai: stiprinimo koeficientas, spartinimo / vėlinimo grandis ir spartinimo / vėlinimo grandis su paankstinimu, įvertinamu naudojant „*Pade*“ aproksimaciją. Palyginus visų tipų kompensatorių reakcijas į trikdantį lauko oro temperatūros pokytį ekstremumo sąlygomis atsižvelgiant į mūsų klimatą (10 °C pokytis per valandą), nustatyta, jog sudėtingiausias kompensatoriaus algoritmas, t. y. spartinimo / vėlinimo grandis su paankstinimu, įvertinamu naudojant „*Pade*“ aproksimaciją, geriausiai eliminuoja trikdantį poveikį, t. y. panaikina dinaminę nuokrypą, bei, palyginus su kitais kompensatoriais, 20 % sumažina maksimalią nuokrypą.
6. Kadangi objekto dinamika tiesiogiai priklauso ir nuo aplinkos oro temperatūros, t. y. esant šiltesnei aplinkos oro temperatūrai reikia daugiau oro slėgio atvėsinti granulėms, tikslinga naudoti adaptyvaus valdymo algoritmą, kuris koreguoja grįžtamojo ryšio reguliatoriaus ir kompensatoriaus parametrus priklausomai nuo lauko oro temperatūros. Tam tikslui reikalinga atlikti papildomą aktyvų eksperimentą tokiomis pat sąlygomis, tik skirtingai lauko oro temperatūrai, tačiau dėl šiltos šių metų žiemos to atlikti nebuvo galimybės.

Literatūros sąrašas

1. AB Achema. Amonio salietros (amonio nitrato) gamybos technologinio proceso aprašas (2012).
2. AB Achema. Amonio salietros gamybos agregato AS-67A technologinė schema (2018).
3. AB Achema. Įrengimo konstrukcijos aprašas (2003).
4. Airikka, P. Advanced control methods for industrial process control. *Computing and control engineering*, 48-52 (2004) [žiūrėta: 2020m. balandžio 22d.] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/3363789_Advanced_control_methods_for_industrial_process_control
5. Ammonium nitrate based fertilizers granulation. [žiūrėta: 2020m. balandžio 15d.] Prieiga per internetą: <https://www.ceamag.com/en/technologies/ammonium-nitrate?id=29>
6. Ammonium nitrate solution synthesis and concentration. [žiūrėta: 2020m. balandžio 15d.] Prieiga per internetą: <https://www.ceamag.com/en/technologies/ammonium-nitrate?id=28>
7. Awouda, A. E., Mamat, R. B. New PID tuning rule using ITAE Criteria. *International journal of engineering* Vol. 3, 597-608 (2015) [žiūrėta: 2020m. gegužės 11d.] Prieiga per internetą: <http://eprints.utm.my/id/eprint/25959/2/IJE-121.pdf>
8. Bolton, W. *Instrumentation and control systems* (second edition). Newnes 2015. ISBN 9780081006139.
9. Galvanauskas, V., Levišauskas D. Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas. Vilnius, 2008. [žiūrėta: 2020m. kovo 13d.]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/421/biotechnologiniu-procesu-modeliavimas-optimizavimas-ir-valdymas/>
10. Hahn, J. Edgar, T. F. Process control. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (2003) [žiūrėta: 2020m. gegužės 9d.] Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471238961.1618150307091522.a01.pub2>
11. Haidekker, M. A. *Linear Feedback Controls; The Essentials*. Elsevier, 2020. [žiūrėta: 2020m. gegužės 3d.] ISBN 9780128187784. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?id=u3bLDwAAQBAJ&lpg=PP1&hl=lt&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
12. Howes, S., LePore, J., Mohler, I., Bolf, N. Implementing advanced process control for refineries and chemical plants. (2015) [žiūrėta: 2020m. balandžio 23d.] Prieiga per internetą: <https://www.picontrolsolutions.com/wp-content/uploads/2015/10/Implementing-Advanced-Process-Control-for-Refineries-and-Chemical-Plants-DOC-Version.pdf>
13. Ketonen, M. Models of a Continuous Fertilizer Granulation Process - Control Design Application. *IFAC Proceedings Volumes*, 139-144 (1992) [žiūrėta: 2020m. balandžio 7d.] Prieiga per internetą: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)50623-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)50623-0)
14. Levišauskas, D. *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas*. Vilnius, 2008. ISBN 9789955202806
15. Martins, F.G. Tuning PID controllers using the ITAE Criterion. *Int. J. Engng Ed. Vol. 21, No. 5*, 867-873 (2005) [žiūrėta: 2020m. balandžio 20d.] Prieiga per internetą: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.158.2654&rep=rep1&type=pdf>
16. Mėnesio (2019m. balandžio) lauko oro temperatūros istorija. [žiūrėta: 2019m. lapkričio 27d.] Prieiga per internetą: <https://www.accuweather.com/lt/lt/kaunas/228309/april-weather/228309?year=2019>

17. Nandong, J. Analytical tuning method for cascade control system via multi-scale control scheme. *International Journal of Automation and Control* 10(2) 167-192 (2016) [žiūrėta: 2020m. gegužės 11d.] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/292616427_Analytical_tuning_method_for_cascade_control_system_via_multi-scale_control_scheme
18. Padhee, S. Controller design for temperature control of heat exchanger system: simulation studies. *WSEAS transactions on systems and control, Vol. 9*, 485-491 (2014) [žiūrėta: 2020m. kovo 25d.] Prieiga per internetą: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2014/a125703-288.pdf>
19. Pereira, G.C., Muddu, S.V., Román-Ospino, A.D. Combined Feedforward/Feedback Control of an Integrated Continuous Granulation Process. *Journal of Pharmaceutical Innovation* 14, 259-285 (2019) [žiūrėta 2020m. balandžio 28d.] Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1007/s12247-018-9347-8>
20. Simutis, R. Sistemų modeliavimas ir identifikavimas. Vilnius, 2008. [žiūrėta: 2020m. gegužės 5d.] ISBN 9789955202554. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/517/sistemu-modeliavimas-ir-identifikavimas/>
21. Smith, C.A. Automated continuous process control. John Wiley and Sons (2003) [žiūrėta: 2020m. balandžio 22d.] ISBN 9780471459262. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?id=QU2fCTcyOa0C&lpg=PA199&ots=9OMqTVG-dF&dq=ammonium%20nitrate%20control%20system&hl=lt&pg=PA205#v=onepage&q&f=false>
22. Smith, C. A., Corripio, A. B. Principles and practice of automatic process control. John Wiley and Sons, Inc (2015) ISBN 9781119219583.
23. Smith, C. L. Practical process control: tuning and troubleshooting. Wiley (2009). ISBN 9780470381939 .
24. Thompson, M. R. Twin screw granulation – review of current progress. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 1223-1231 (2015) [žiūrėta: 2020m. balandžio 3d.] Prieiga per internetą: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/03639045.2014.983931>