



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

**Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos
sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Jonas Lukoševičius

Projekto autorius

Prof. dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Jonas Lukoševičius

Projekto autorius

Prof. dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Doc. dr. Tomas Tekorius

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Jonas Lukoševičius

Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Jono Lukoševičiaus, baigiamasis projektas tema „Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Lukoševičius, Jonas. Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos, Elektros ir Elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: karbamido sintezė, perdavimo funkcija, automatinio valdymo sistema, pakopinė, tiesioginio ryšio, PID, Kappa-Tau, Cohen-Coon, adaptyvusis valdymas, stiprinimo numatymas.

Kaunas, 2020. 58 p.

Santrauka

Šiame darbe aprašomas karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas AB „Achema“ karbamido gamybos technologinio proceso vykdymo agregate.

Atlikta karbamido gamybos technologinio proceso sintezės skyriaus analizė ir cheminės technologijos procesų automatinio valdymo sistemų modelių kūrimo metodiką aprašančios literatūros apžvalga.

Pateikti karbamido sintezės kolonoje atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatai, kurie naudoti technologinio proceso dinamiką aprašančioms perdavimo funkcijoms identifikuoti. Naudojant pakopinę ir tiesioginio/grižtamojo ryšio struktūras, sukurtos karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos. Regulatoriai suderinti taikant Kappa-Tau ir Cohen-Coon taisykles. Valdomo objekto netiesiškumui kompensuoti, pasitelkus adaptyvųjį valdymą, sudarytuose modeliuose įvesti stiprinimo numatymo blokai.

Remiantis „Chemotaxis“ atsitiktinės paieškos optimizavimo metodu, *Matlab* aplinkoje atlikta perdavimo funkcijų identifikavimo procedūra. Naudojant *Simulink* paketą, sudaryti ir ištirti pakopinės, tiesioginio/grižtamojo ryšio struktūrų karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemų modeliai. Atlikus tyrimo rezultatų analizę, suformuluotos išvados.

Lukoševičius, Jonas. Development and investigation of urea synthesis column control system. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Donatas Levišauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: urea synthesis, transfer function, control system, cascade control, feedforward control, PID, Kappa-Tau, Cohen-Coon, adaptive control, gain scheduling.

Kaunas, 2020. 58 pages.

Summary

Development and investigation of urea synthesis column control system is described in this thesis.

Literature analysis of urea production, synthesis section and review of chemical processes control systems model's creation methodology was performed.

Results of urea synthesis column experimental investigation was published and used for identification of transfer functions, which represent dynamics of process model. Feedforward/feedback and cascade structure control systems for urea synthesis column control were created, Kappa-Tau and Cohen-Coon rules used for PID tuning. In order to compensate non-linearity of controlled object, adaptive control, gain scheduling technique was introduced.

Identification of transfer functions was performed on *Matlab* application using "Chemotaxis" optimization method which is based on random search. Feedforward/feedback and cascade structure urea synthesis control system models have been created and investigated on *Simulink*. By the analysis of investigation results the conclusions were formed.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas	12
1 Objekto analizė	13
1.1 Atlikti tyrimai panašia tematika	13
1.2 Karbamido sintezės proceso apžvalga ir analizė	14
1.2.1 Sintezės metu vykstančios cheminės reakcijos	14
1.2.2 Reakcijų vykdymo kokybiniai kriterijai	15
1.2.3 Sintezės kolona ir jos technologinių parametrų stebėsenos sistema	16
1.2.4 Pradinių reaktantų tiekimo sistemos	17
2 Tyrimų dalis	19
2.1 Karbamido sintezės kolonos modelio sudarymo metodika	19
2.1.1 Modelio tipo parinkimas.....	19
2.1.2 Eksperimentinio tyrimo planavimas.....	20
2.1.3 Perdavimo funkcijų parametrų identifikavimo metodika.....	20
2.1.4 „Chemotaxis“ atsitiktinės paieškos metodo pritaikymas perdavimo funkcijų parametrų identifikavimo strategijai realizuoti	21
2.2 Karbamido sintezės technologinio proceso valdymo metodų ir sistemų apžvalga.....	22
2.2.1 Automatinio valdymo sistemos kūrimo prielaidos	22
2.2.2 Tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistema	23
2.2.3 Tiesioginio ryšio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti	24
2.2.4 Pakopinės sistemos pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti	25
2.2.5 Pakopinės sistemos pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti	26
2.3 Reguliatorių derinimo metodai	26
2.3.1 Temperatūros valdymo kontūro derinimo metodo parinkimas.....	26
2.3.2 Pradinių reaktantų srautų molinio santykio valdymo kontūro derinimo metodo parinkimas	27
2.3.3 Pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrų identifikavimas.....	27
2.3.4 Cohen ir Coon metodas	28
2.3.5 Kappa ir Tau metodas.....	30
2.4 Adaptyvusis valdymas.....	31
2.4.1 Stiprinimo numatymas.....	32
2.4.2 Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymo karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemoms prielaidos.....	32
2.4.3 Stiprinimo numatymo algoritmo įvedimas karbamido sintezės automatinio valdymo sistemoms	33
3 Projektinė dalis	34
3.1 Karbamido sintezės kolonos eksperimentinis tyrimas	34
3.1.1 Šuolinės reakcijos eksperimentas perdavimo funkcijoms nustatyti.....	34
3.1.2 Perdavimo funkcijų identifikavimo procedūra	36

3.1.3	Modeliuojamų ir eksperimentinių parametrų verčių palyginimas	38
3.2	Valdymo sistemų modelių sudarymas ir derinimas	40
3.2.1	Karbamido sintezės kolonos modelio sudarymas	40
3.2.2	Tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, modelio sudarymas ir derinimas	40
3.2.3	Pakopinės valdymo sistemos modelio sudarymas ir derinimas	43
3.2.4	Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymas ir įvedimas ARS modeliams	46
3.3	Modeliavimo rezultatų palyginimas ir analizė.....	48
3.3.1	Tiesioginio ryšio valdymo sistemos paremtos grįžtamoju ryšiu modelių reakcijos į trikdantįjį poveikį analizė.....	48
3.3.2	Pakopinės valdymo sistemos modelių reakcijos į trikdantįjį poveikį analizė	50
	Išvados	52
	Literatūros sąrašas.....	53
	Priedai	55
1	priedas. <i>Matlab</i> aplinkoje parašytas kodas, skirtas pirmosios eilės perdavimo funkcijų parametrų nustatymui, naudojant „Chemotaxis“ paieškos algoritmą ir eksperimentinius duomenis	55
2	priedas. <i>Matlab</i> aplinkoje parašytas kodas, skirtas antrosios eilės perdavimo funkcijų parametrų nustatymui, naudojant „Chemotaxis“ paieškos algoritmą ir eksperimentinius duomenis	56
3	priedas. <i>Simulink</i> aplinkoje sudaryta adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos modelio stiprinimo numatymo algoritmo schema	57
4	priedas. <i>Simulink</i> aplinkoje sudaryta adaptyviosios pakopinės automatinio valdymo sistemos modelio stiprinimo numatymo algoritmo schema	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skystos ir dujinės kolonos užpildo sričių temperatūros ir tiekiamų amoniako, anglies dioksido srautų molinio santykio $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ vertės atitikmenų pirmoji dalis.....	16
2 lentelė. Skystos ir dujinės kolonos užpildo sričių temperatūros ir tiekiamų amoniako, anglies dioksido srautų molinio santykio $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ vertės atitikmenų antroji dalis	16
3 lentelė. Cohen ir Coon reguliatorių parametrų derinimo formulės	29
4 lentelė. PI reguliatorių derinimui Kappa-Tau metodu reikalingų charakteristikų vertės	30
5 lentelė. PID reguliatorių derinimui Kappa-Tau metodu reikalingų charakteristikų vertės.....	31
6 lentelė. Šuolinio eksperimento rezultatų, vykdant projektinės apkrovos technologinį procesą, pirmoji dalis. CO_2 tiekimo srauto intensyvumo reakcija į grįžtamo srauto valdymo įtaiso pravėrimo laipsnio pokytį	34
7 lentelė. Šuolinio eksperimento rezultatų, vykdant projektinės apkrovos technologinį procesą, antroji dalis. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį. 35	
8 lentelė. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį vykdant didesnės nei projektinė apkrovos technologinį procesą	35
9 lentelė. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį vykdant mažesnės nei projektinė apkrovos technologinį procesą	36
10 lentelė. Identifikuotos anglies dioksido srauto intensyvumo $W\text{CO}_2(s)$ ir sintezės kolonoje susidariusio karbamido lydalo temperatūros $Wt_{21}(s)$, $Wt_{22}(s)$, $Wt_{23}(s)$ perdavimo funkcijų parametrų vertės.....	37
11 lentelė. Adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos temperatūros kontūro PID reguliatoriaus parametrų rinkiniai.....	47
12 lentelė. Adaptyviosios pakopinės automatinio valdymo sistemos temperatūros kontūro PID reguliatoriaus parametrų rinkiniai.....	47
13 lentelė. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS sistemų reguliavimo laiko ir dinaminių nuokrypų vertės, karbamido sintezės veikiant technologinio režimo, mažos apimties ($F_{\text{NH}_3} < 38$), gamybos technologinio režimo atvejais intensyvios gamybos ($F_{\text{NH}_3} > 47$) technologinio režimo, projektinio ($38 < F_{\text{NH}_3} < 47$)	49
14 lentelė Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios pakopinės ARS sistemų, reguliavimo laiko ir dinaminių nuokrypų vertės, karbamido sintezės veikiant intensyvios gamybos ($F_{\text{NH}_3} > 47$) technologinio režimo, projektinio ($38 < F_{\text{NH}_3} < 47$), technologinio režimo, mažos apimties ($F_{\text{NH}_3} < 38$) gamybos technologinio režimo atvejais	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sintezės reakcijų efektyvumo priklausomybės nuo lydalo skystos fazės temperatūros sintezės kolonoje kreivės	15
2 pav. Supaprastinta karbamido sintezės kolonos technologinė schema.....	17
3 pav. Amoniako NH ₃ tiekimo į sintezės koloną sistemos technologinė schema	17
4 pav. Anglies dioksido CO ₂ tiekimo į sintezės koloną sistemos technologinė schema.....	18
5 pav. Karbamido sintezės kolonoje planuojamo atlikti šuolinio eksperimento pavyzdys	20
6 pav. „Chemotaxis“ metodo realizacijos Matlab aplinkoje algoritmas	22
7 pav. Tiesioginio ryšio reguliavimo sistemos schema	23
8 pav. Tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, schema.....	24
9 pav. Tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos schema	25
10 pav. Pakopinės automatinio valdymo sistemos schema	25
11 pav. Pakopinės automatinio valdymo sistemos schema, pritaikyta automatiškai valdyti karbamido sintezės koloną.....	26
12 pav. Antrosios eilės perdavimo funkcijos ir Smito metodu perskaičiuoto pirmosios eilės ekvivalento grafikai. Čia y_{inf} atitinka (15–16) naudojamą y_{∞}	28
13 pav. Adaptyvios, stiprinimo numatymu paremtos valdymo sistemos blokinė schema	32
14 pav. Adaptyvios tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, schema, pritaikyta karbamido sintezės kolonos automatiniam valdymui.....	33
15 pav. Adaptyvios pakopinės automatinio valdymo sistemos schema, pritaikyta karbamido sintezės kolonos automatiniam valdymui.....	33
16 pav. Eksperimentinių (žr. 6 lentelę) reikšmių ir $WCO2(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas	38
17 pav. Eksperimentinių (žr. 7 lentelę) reikšmių ir $Wt22(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas	38
18 pav. Eksperimentinių (8 lent.) reikšmių ir $Wt21(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas.....	39
19 pav. Eksperimentinių (žr. 9 lentelę) reikšmių ir $Wt23(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas	39
20 pav. Perdavimo funkcijomis paremtas karbamido sintezės kolonos modelis	40
21 pav. Specifinės formos Kappa-Tau PID regulatoriaus modelis. Čia b – derinimo parametras, T_i – integruojančios, o T_d – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji, P – regulatoriaus stiprinančiosios dedamosios daugiklis.....	41
22 pav. Pirminės, grįžtamoju ryšiu paremtos automatinio valdymo sistemos modelis.....	41
23 pav. 2-osios ir 1-osios eilės karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų palyginimas ..	42
24 pav. Tiesioginiu/grįžtamoju ryšiu paremtos automatinio valdymo sistemos modelis.....	43
25 pav. Pakopinės valdymo sistemos vidinio pradinių sintezės reaktantų srautų molinio santykio kontūro modelis	44
26 pav. Šuolinis eksperimentas, atliktas pradinių sintezės reaktantų valdymo kontūro derinimo parametrams nustatyti	44
27 pav. Pakopinės karbamido lydalo temperatūros valdymo sistemos modelis	45
28 pav. 2-osios ir 1-osios eilės karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų palyginimas ...	45
29 pav. Adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS modelis, įvedus stiprinimo numatymo bloką	46

30 pav. Adaptyviosios pakopinės ARS modelis, įvedus stiprinimo numatymo bloką.....	47
31 pav. Atliekant eksperimentus tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS modeliuose įvestų amoniako tiekimo srauto intensyvumą trikdančių poveikių kreivės.....	48
32 pav. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS pradinių reaktantų tiekimo santykių valdymo, kompensuojant amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį, pereinamojo proceso kreivių palyginimas: a) intensyvios gamybos technologinio režimo atveju; b) projektinio technologinio režimo atveju; c) mažos apimties gamybos technologinio režimo atveju	48
33 pav. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios pakopinės ARS pradinių reaktantų tiekimo santykių ir karbamido lydalo temperatūros valdymo, kompensuojant amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį, pereinamojo proceso kreivių palyginimas: a) intensyvios gamybos technologinio režimo atveju; b) projektinio technologinio režimo atveju; c) mažos apimties gamybos technologinio režimo atveju	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

CSTR – idealaus sumaišymo reaktorius (*angl. continuous stirred-tank reactor*).

MPC – modeliu paremtas valdymas (*angl. model predictive control*).

SMC – perjungimu paremtas valdymas (*angl. sliding mode control*).

ARS – automatinio reguliavimo sistema.

PID – reguliatorius, kurį sudaro trys grandys: proporcinė (P), integruojančioji (I), diferencijuojančioji (D).

PD – reguliatorius, kurį sudaro trys grandys: proporcinė (P), diferencijuojančioji (D).

PI – reguliatorius, kurį sudaro trys grandys: proporcinė (P), integruojančioji (I).

Terminai:

Tiesioginio/grižtamojo ryšio automatinio valdymo sistema – tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistema, paremta grįžtamuju ryšiu.

Ivadas

Darbe kuriama ir tiriama Karbamido ceche, veikiančiame akcinėje bendrovėje „Achema“, įrengtos karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistema. Į gamybos įrenginį nepertraukiamai tiekiami skysto amoniako ir dujinės agregatinės būsenos anglies dioksido srautai. Iš tiekiamų medžiagų sintezės reakcijų metu išgaunamas lydalo fazės karbamidas. Kolonos produkcijos išėigos kokybė itin jautri reakcijos vykdymo temperatūros pokyčiams, kuriuos lemia pradinių reaktantų tiekimo srautų intensyvumo santykio pasikeitimai, todėl svarbu užtikrinti aukštą šių technologinių parametrų valdymo kokybę.

Temos aktualumas

Vykdamas karbamido cecho modernizaciją, sudarytos sąlygos technologiniam personalui, naudojant kompiuterinę valdymo sistemą, iš centrinio valdymo pulto reguliuoti į karbamido sintezės koloną tiekiamų NH_3 ir CO_2 srautų intensyvumą, stebėti jų molinio santykio ir kitų technologinių parametrų elgseną. Modernizacijos projekte automatinio valdymo sistemos sukūrimas nebuvo numatytas, todėl visa proceso kontrolė patikėta sintezės skyriaus operatoriams. Vykstant kartų kaitai, įmonėje lieka vis mažiau darbuotojų, gebančių užtikrinti tinkamą sintezės kolonos valdymo kokybę. Dėl didelės (~2350000 kg/d) gamybos apimtys technologinio personalo darbo netikslumai bendrovei atsieina itin brangiai. Ieškant išeičių iš susiklosčiusios situacijos, vis dažniau svarstoma automatinės karbamido sintezės kolonos valdymo sistema, kurios sukūrimo ir tyrimo procedūros bei galimybės aprašytos šiame darbe.

Tiriamąo projekto tikslas

Sukurti ir iširti karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemą, gebančią laiku kompensuoti pradinių sintezės reakcijų reaktantų tiekimo srautų santykį veikiančius, trikdančiuosius poveikius ir užtikrinti aukštą karbamido lydalo temperatūros palaikymo kokybę.

Tiriamąo projekto uždaviniai

1. Atlikus karbamido gamybos sintezės skyriaus technologinio proceso analizę, suformuluoti tiriamąo projekto tikslą, parinkti automatinio valdymo sistemos struktūrą.
2. Surinkti technologinių parametrų stebėjimo duomenis, panaudoti juos valdymo sistemos modelio sudarymui.
3. Parinkti reguliatorių derinimo metodus ir suderinus sudarytą valdymo sistemos modelį, išbandyti jo veikimą.
4. Įvesti adaptyvųjį valdymą, iširti jo įtaką proceso valdymo kokybei.
5. Remiantis tyrimų rezultatais suformuluoti išvadas.

1 Objekto analizė

1.1 Atlikti tyrimai panašia tematika

Dar 1993 metais H. A. Irozoqui, M. A. Isla, C. M. Genoud pristatė dviejų dalių mokslinių straipsnių seriją pavadinimu „Simulation of a Urea Synthesis Reactor“ [1]. Antroje dalyje pateiktas karbamido sintezės reaktoriaus matematinio modelio, kurio termodinaminės dalies sudarymas detalai išnagrinėtas ir perteiktas pirmajame straipsnyje, formavimo procedūros aprašymas. Modelio sudarymo procesas buvo padalintas į du etapus. Kiekviename etape sudaryta energijos ir masės balansų lygtis, įvesta daugiau nei 20 konstantų ir parametrų. Išbandžius modelį įvairiomis sąlygomis, simuliacijose, visais atvejais gauti tikslūs rezultatai.

2004 metais mokslinių publikacijų žurnale „Chemical Engineering Journal“ buvo išspausdintas M. Hamidipour, N. Mostoufi ir R. Sotudeh-Glaredagh straipsnis „Modeling the synthesis section of an industrial urea plant“ [2]. Autoriai, siekdami kuo tiksliau pavaizduoti karbamido sintezės technologinį procesą, modelio sudarymui panaudojo 10 CSTR reaktorių. Iki tol moksliniuose darbuose karbamido sintezės reakcija buvo laikyta homogenine. Formuojant šiame straipsnyje aprašytą modelį, įvertintas ir karbamido sintezės reakcijos heterogeniškumas. Modeliavimo rezultatus palyginus su realiais modeliuoto agregato duomenimis, daugeliu atveju rezultatai sutapo.

2006 metais O. M. A. Manozca, J. J. Espinosa, J. Vandewalle publikavo straipsnį, kuriame pateikta karbamido gamybos sintezės skyriaus ARS, paremta MPC reguliatoriumi [3]. Sistema užtikrina kokybišką reaktoriaus lygio, slėgio ir temperatūros parametrų valdymą ir maksimalią produkto išėigą. NH_3/CO_2 santykiui palaikyti ir trikdantiesiems poveikiams kompensuoti panaudoti PID reguliatoriai su tiesioginėmis grandimis.

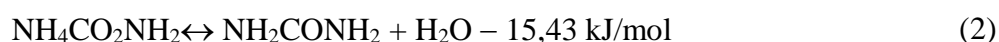
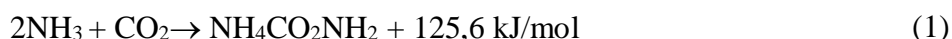
2016 metais grupė Mansoura universiteto kompiuterijos ir valdymo sistemų inžinerijos katedros mokslininkų sudarė karbamido sintezės proceso valdymo SMC reguliatorių sistemą. Išbandę jos veikimą matematiniam proceso modelyje, minėti mokslininkai rezultatus pateikė publikacijoje [4]. Sintezės reaktoriaus temperatūros, slėgio ir NH_3/CO_2 tiekimo srautų santykiui valdyti panaudojus autorių pasiūlytą valdymo sistemą, lyginant su įprastiniais PID reguliatoriais valdomu procesu, gautas ryškus parametrų valdymo kokybės ir produkcijos išėigos pagerėjimas.

1.2 Karbamido sintezės proceso apžvalga ir analizė

Karbamido sintezė – esminė šios azoto trąšos gamybos technologinio proceso, vykdomo AB „Achema“ Karbamido cecho agregatuose, dalis. Skyriuje apžvelgtos sintezavimo metu vykstančios cheminės reakcijos, išsamiau išnagrinėtos ir aprašytos automatinio valdymo sistemos sukūrimui svarbios detalės (jų vykdymo kokybiniai kriterijai ir pradinių reaktantų tiekimo sistemų struktūra, veikimas, įtaka technologiniam procesui).

1.2.1 Sintezės metu vykstančios cheminės reakcijos

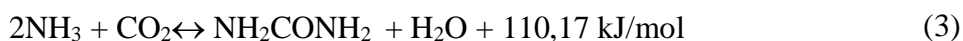
Karbamido sintezė vykdoma sintezės kolonoje, kurioje vyksta amonio karbamato ir karbamido susidarymo procesas pagal pagrindines reakcijas (1) ir (2) [5]:



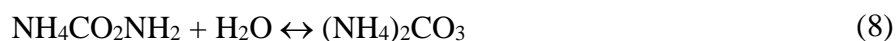
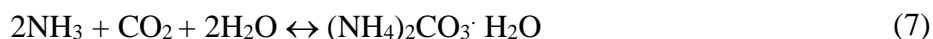
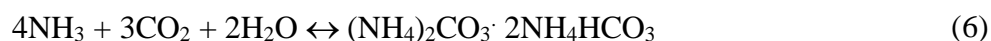
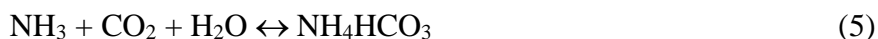
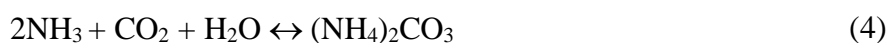
Iš skysto amoniako NH_3 ir anglies dioksido dujų egzoterminės reakcijos (1) metu susidaro amonio karbamatas $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$ bei šiluma, o endoterminės reakcijos (2) metu amonio karbamatas skyla į karbamidą NH_2CONH_2 , vandenį H_2O ir išsikvojama susidariusios šilumos dalis, vykstant reakcijai (1).

Abi reakcijos (1) ir (2) sintezės kolonoje vyksta tokiomis sąlygomis, kurioms esant produktai gaunami dujų ir skysčio mišinio pavidale. Skysta fazė – karbamido ir amonio karbamato tirpalas amoniake ir vandenyje, o dujinė fazė – amoniako, anglies dioksido, vandens garų mišinys.

Suminę (3) karbamido susidarymo reakciją išsiskiriant šilumai galima užrašyti [5]:



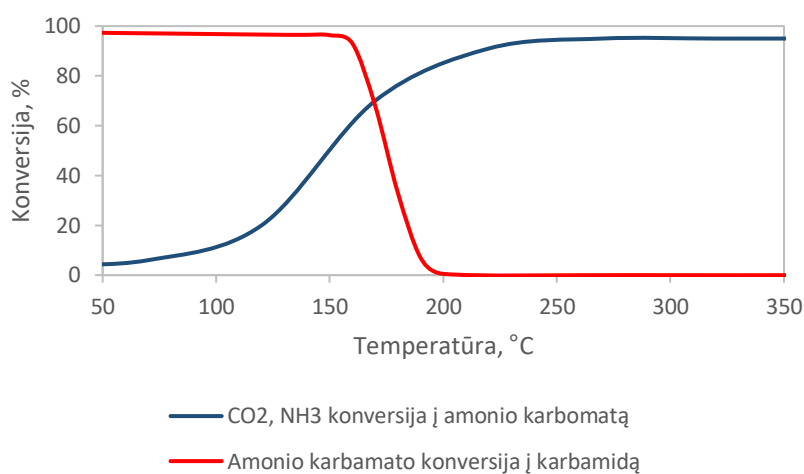
Iš skysto amoniako NH_3 ir anglies dioksido dujų CO_2 , reakcijos (3) metu išgaunamas karbamidas NH_2CONH_2 ir šalutiniai produktai – vanduo H_2O bei šiluma. Be šios reakcijos sintezės kolonoje vyksta ir šalutinės reakcijos (4) ÷ (8), kurių metu susiformuoja anglies amonio druskų junginiai [5]:



1.2.2 Reakcijų vykdymo kokybiniai kriterijai

Amoniakas NH_3 ir anglies dioksido CO_2 jungimo į amonio karbamatą $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$ (1) ir jo virsmo į karbamidą (2) reakcijų arba karbamido sintezės (3) reakcijos kokybė tiesiogiai priklauso nuo sintezės kolonos užpildo temperatūros, slėgio ir reakcijos pirminių komponentų (NH_3 , CO_2) molinio santykio jos viduje.

Amonio karbamato virsmo į karbamidą (2) efektyvumas (žr. 1 pav.) tiesiogiai priklauso nuo lydalo skystos fazės temperatūros [6]. Temperatūrai kylant, reakcijos produktyvumas nepertraukiamai didėja, eksponentiniai artima priklausomybe, tačiau peržengus apytiksliai 175°C ribą, itin suprastėja pirminės sintezės reakcijos $-\text{CO}_2$ ir NH_3 – konversijos į $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$ efektyvumas, o ties 195°C riba ji praktiškai visiškai nustoja vykti. Ištyrus ir įvertinus šias pagrindinių sintezės reakcijų savybes, idealia kolonos vidaus temperatūra priimta laikyti 161°C [6].



1 pav. Sintezės reakcijų efektyvumo priklausomybės nuo lydalo skystos fazės temperatūros sintezės kolonoje kreivės

Gamybos reglamente technologiniam personalui pateiktos (žr. 1, 2 lenteles) orientacinės pradinių sintezės reaktantų $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ molinio santykio ir temperatūros atitiktoms vertėms [6]. Santykis (3,2 ÷ 4,5):1 užtikrina $140 \div 170^\circ\text{C}$ skystos fazės temperatūrą ir (žr. 1 pav.) kreivėse atitinka 40 ÷ 60 % anglies dioksido konversijos į karbamidą vertes. Didžiausia karbamido išeiga gaunama palaikant 3,6:1 molinio santykio vertę. Temperatūros vertės nustatytos esant artimai 100 % anglies dioksido dujų koncentracijai.

Atliekant temperatūros kolonos viduje priklausomybės nuo reakcijų komponentų santykio tyrimą pastebėta, kad įvedus amoniako perteklių, amonio karbamato skilimo į karbamidą reakcijos (2) produktyvumas auga, taip pat susidaro mažiau šalutinių, pirminę sintezės reakciją (1) trikdančių ir kolonos vidų parazitaiškai veikiančių produktų, o padidintas anglies dioksido kiekis sintezės reakcijų vykdymo produktyvumo nepaveikia [7].

Susidarius CO_2 pertekliui, kolonos sintezės viduje esančioms medžiagoms sudaromos sąlygos kristalizuotis, išbalansuojamas visas gamybos procesas, todėl visada didesnę dalį lydalo kolonos viduje sudaro amoniakas (žr. 1, 2 lenteles).

1 lentelė. Skystos ir dujinės kolonos užpildo sričių temperatūros ir tiekiamų amoniako, anglies dioksido srautų molinio santykio $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ vertės atitikmenų pirmoji dalis

	$\text{NH}_3:\text{CO}_2$	4,5:1	4,4:1	4,3:1	4,2:1	4,1:1	4,0:1	3,9:1
Temperatūra, °C	Skysta fazė	140	142	145	147	149	152	154
	Dujinė fazė	185	186	187	187	188	189	190

2 lentelė. Skystos ir dujinės kolonos užpildo sričių temperatūros ir tiekiamų amoniako, anglies dioksido srautų molinio santykio $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ vertės atitikmenų antroji dalis

	$\text{NH}_3:\text{CO}_2$	3,8:1	3,7:1	3,6:1	3,5:1	3,4:1	3,3:1	3,2:1
Temperatūra, °C	Skysta fazė	156	158	161	163	165	168	170
	Dujinė fazė	190	191	192	193	193	194	195

Abiejų sintezės reakcijų (1) ir (2) produktyvumas tiesiogiai priklauso nuo kolonos viduje palaikomo suspaudimo. Priešingai nei 1.3.1 atveju, net ir santykinai itin didelis slėgio prieaugis vykdomų sintezės reakcijų nesutrikdytų, tačiau dėl potencialių technologinio proceso komplikacijų ir įrenginių konstrukcinių apribojimų, nutarta įrenginyje palaikyti maksimalų leistiną $18,0 \div 20$ MPa slėgį [6].

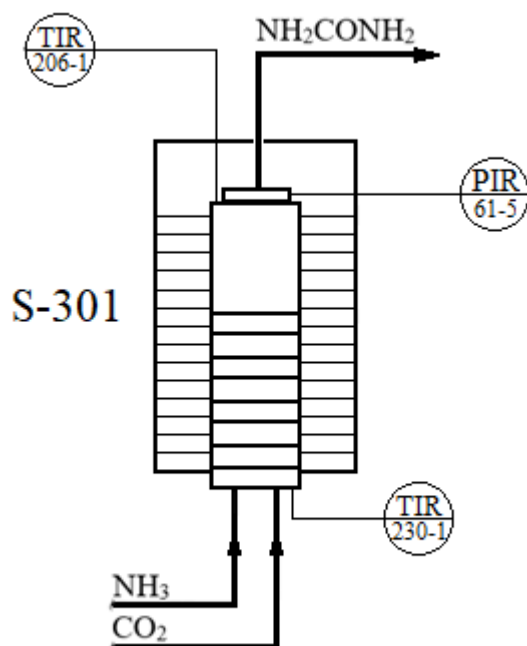
Sintezavimo kokybę, be aukščiau išvardintų faktorių, lemia ir pradinė žaliavų kokybė [6]. Priemaišų, dažniausiai inertinių dujų forma, įprastai pasitaiko anglies dioksido CO_2 dujose, o skystame amoniake NH_3 retkarčiais aptinkama sieros ir jos junginių pėdsakų. Įsimašiusios inertinės dujos tiesiogiai mažina karbamido išėigą, o sieros junginių priemaišos intensyviną įrangos koroziją. Abiem atvejais švaistoma energija priemaišų suspaudimui.

1.2.3 Sintezės kolona ir jos technologinių parametru stebėsenos sistema

Karbamido sintezės kolonos (žr. 2 pav. poz. S-301) viduje futeruotas chromo, nikelio, molibdeno plieniu cilindro formos įrenginys, specialiai sukonstruotas karbamido sintezei (1), (2) vykdyti.

Į kolonos apatinę dalį tiekiami pagrindinės sintezės reakcijos (3) vykdymo pradiniai komponentai – skystas amoniakas NH_3 ir anglies dioksido dujos CO_2 , kurių santykis aprašytas 1.2.2, o tiekimo sistemos – 1.4.1 ir 1.4.2 poskyriuose. Iš kolonos išeina apatinėje jos dalyje susiformavęs skystos bei viršutinėje dalyje susidariusio dujinio karbamido lydalo mišinys, kuris vėliau distiluojamas, perdirbamas forišgarinimo ir išgarinimo įrenginiuose ir priliuojamas.

Slėgiui sintezės kolonoje (poz. S-301) stebėti sumontuotas slėgio keitiklis (poz. PIR-61-5), o temperatūrai – dvi termoporos (poz. TR-206-1 ir poz. TR-230-1) [8]. Nominalus įrenginio darbinis slėgis siekia $18,0 \div 20,0$ MPa, o temperatūra svyruoja $140 \div 200$ °C ribose (priklauso nuo $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ santykio ir pasirinkto matavimo taško). Šių parametru vertėms pasiekus įspėjamąsias ribas suveikia numatytos signalizacijos, o peržengus kritines – technologinį procesą nutraukiančios blokuotės.

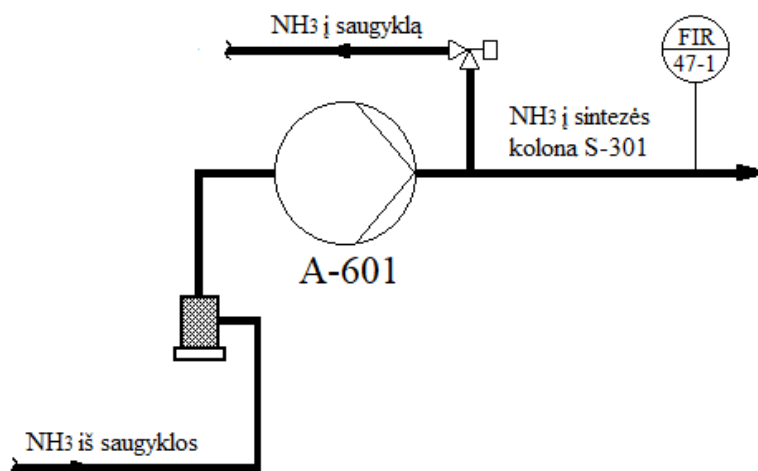


2 pav. Supaprastinta karbamido sintezės kolonos technologinė schema

1.2.4 Pradinių reaktantų tiekimo sistemos

Iš NH_3 saugyklos skystas amoniakas patenka į plunžerino siurblio (žr. 3 pav. poz. A-601) įsiurbimą. Maksimalus siurblio našumas – $60 \text{ m}^3/\text{val}$ [8], tiekiamo skysčio temperatūra – $60 \div 90^\circ \text{C}$, o suspaudimo slėgis yra $19,0 \div 21,0 \text{ MPa}$ [6]. Amoniako srauto intensyvumas valdomas netiesiogiai, per reguliuojantį vožtuvą suspaudimo perteklių nukreipiant atgal į pradinę talpyklą.

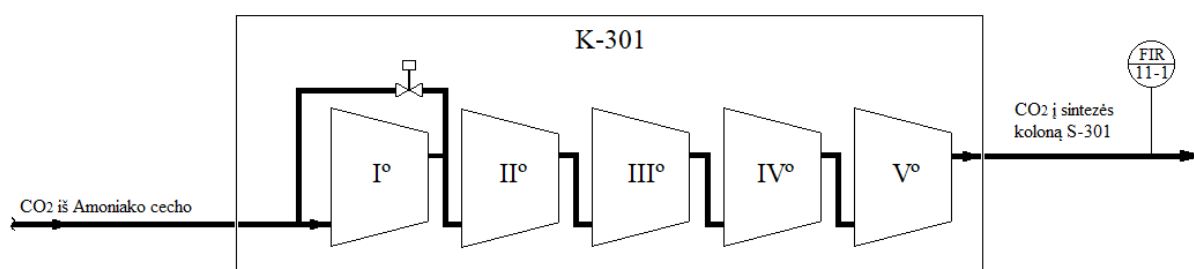
Į sintezės koloną (žr. 1 pav. poz. S-301) tiekiamo amoniako srauto didumo pokyčiams stebėti sumontuotas srauto matuoklis (žr. 3 pav. poz. FIR-47-1) [8]. Atsižvelgus į matavimo įtaiso rodmenis, operatorius nustato vožtuvo pravėrimo laipsnį ir taip perteklinę srauto dalį grąžina atgal į pradinę saugyklą.



3 pav. Amoniako NH_3 tiekimo į sintezės koloną sistemos technologinė schema

Anglies dioksidas tiekiamas kompresijos skyriaus kompresoriumi (žr. 4 pav. poz. K-301) $2000 \div 10000 \text{ m}^3/\text{val.}$ srautu [8], $19,0 \div 20,0 \text{ MPa}$ slėgiu, ne didesnės kaip 120° C temperatūros [6]. Kompresoriaus našumas valdomas (žr. 4 pav.) sistema, kurios veikimas primena 1.4.1 poskyriuje aprašytą amoniako tiekimo sistemą. Šiuo atveju perteklinis CO_2 srautas iš kompresoriaus K-301 pirmo laipsnio suspaudimo grąžinamas į to paties laipsnio įsiurbimą.

Į sintezės koloną poz. S-301 (žr. 2 pav.) tiekiamo anglies dioksido srauto kitimui stebėti sumontuotas srauto matuoklis (žr. 4 pav. poz. FIR-11-1) [8]. Atsižvelgus į matuoklio rodmenis, operatorius, nustatydamas apvadinėje pirmo laipsnio suspaudimą ir to paties laipsnio įsiurbimą jungiančioje linijoje esančios sklendės atsidarymo laipsnį, kontroliuoja grąžinamo atgal į įsiurbimo sritį anglies dioksido srautą ir taip valdo kompresoriaus darbo našumą.



4 pav. Anglies dioksido CO_2 tiekimo į sintezės koloną sistemos technologinė schema

2 Tyrimų dalis

2.1 Karbamido sintezės kolonos modelio sudarymo metodika

Atliekant automatinio valdymo sistemos kūrimo ir derinimo procedūras, reikalinga galimybė manipuliuoti valdomus objekto parametrus ir stebėti sistemos reakciją į jų pokyčius. Chemijos pramonėje vyrauja nepertraukiami technologiniai procesai, o jų metu vykstančios reakcijos jautrios kokybinių kriterijų pokyčiams, todėl galimybės eksperimentuoti su realiais objektais ribotos. Tokiais atvejais eksperimentiniai tyrimai atliekami pasitelkus virtualius jų ekvivalentus–modelius. Šiame poskyriuje aprašyti karbamido sintezės kolonos modelio sudarymui naudoti metodai, paaiškintos jų pasirinkimų priežastys.

2.1.1 Modelio tipo parinkimas

Remiantis moksline literatūra, išskiriami du pagrindiniai modelių formavimo metodai – teorinis ir empirinis. Modeliuojant sudėtingus procesus naudojamos hibridinėmis vadinamos kombinuotos jų sistemos, kuriose panaudojami abiejų metodų privalumai [9, 10].

Teoriniai modeliai aprašomi matematinėmis lygtimis, sudarytomis remiantis klasikiais fizikos ir balanso dėsniais, todėl literatūros šaltiniuose dar minimi ir matematinio arba baltosios dėžės modelių pavadinimai.

Empirinio arba juodosios dėžės modelio sudarymo operacija vadinama identifikavimu. Jos metu, pasitelkiant modeliuojamo objekto eksperimentinių tyrimų metu surinktus duomenis, aproksimuojamos priklausomybės tarp tiriamo proceso įėjties parametrų ir produktą aprašančių išėjties įverčių dydžių. Nustatyti šių dydžių sąryšiai perteikiami polinomais, perdavimo funkcijomis, dirbtiniais neuronų tinklais ar kitais pasirinktais metodais.

Empirinių ir matematiniai modeliai sudarymo ir detalumo atžvilgiu pasižymi atvirkštinėmis savybėmis. Identifikuojant gaunami specifiniai modeliai, jų sudarymo procedūra nereikalauja detalių žinių apie modeliuojamą objektą ir jo elgseną, tačiau būtina galimybė atlikti objekto eksperimentinį tyrimą, modelis neaprašo būsenos kintamųjų dinamikos [10]. Matematinų modelių forma detali ir universali, pritaikoma panašioms objektams. Konstantoms nustatyti dažnai atvejais pakanka archyvuojamų duomenų, tačiau sudėtingesnė sudarymo operacija užtrunka gerokai ilgiau, o specifinės, fundamentaliais dėsniais neapibrėžiamos objektų savybės lieka neapibrėžtos [11].

Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemos kūrimui ir derinimui atlikti reikalingas objekte susidarančio karbamido lydalo temperatūros reakcijos į sintezės cheminių reakcijų pradinių reaktantų srautų molinio santykio pokytį modelis.

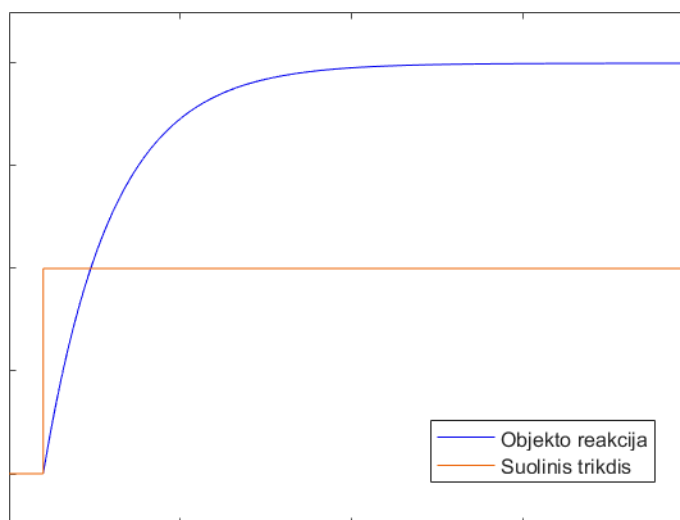
Didelių gabaritų kolona pastatyta prieš kelias dešimtis metų, todėl jos situacija gali būti nutolusi nuo pradinės, kurią galima aprašyti fundamentaliais dėsniais. Vidiniai kolonos virsmai ir juos aprašantys dydžiai valdymo sistemos kūrimo atžvilgiu nereikšmingi, o sudarant juodosios dėžės modelį, pakaktų identifiuoti trijų grandžių modelius. Kolonos apkrovimas nuolatos keičiamas, parametrų pokyčiai registruojami, todėl didelė tikimybė, radus šuolinį eksperimentą atitinkančius duomenis ūkiskaitos archyve, pritaikyti juos identifikavimo procedūrai atlikti ir išvengti realaus objekto eksperimentinio tyrimo vykdymo realiame objekte.

Įžvelgus galimybę (panaudojant laisvai prieinamus duomenis) dar labiau supaprastinti identifikavimo procedūrą ir suabejojus potencialaus karbamido sintezės kolonos teorinio modelio privalumų nauda ir tikslumu nuspręsta atsisakyti matematinio modelio idėjos ir sudaryti empirinį.

2.1.2 Eksperimentinio tyrimo planavimas

Esminė 2.1.1 skyriuje aprašyto empirinio modelio sudarymo procedūros dalis – eksperimentas, kurio metu vienas arba keli modeliuojamo objekto parametrai pervedami iš vienos nusistovėjusios būsenos į kitą, taip pat stacionarią. Atliekant bandymą, objekto įėjime įvedamas numatyto parametro pokytis, o jo išėjimo parametrų vertės stebimos ir registruojamos.

Eksperimentai skirstomi pagal įvesto pokyčio signalo tipą, kuris parenkamas įvertinus jo realizavimo galimybes ilgalaikį poveikį objektui ir kitus rizikos faktorius. Literatūros šaltiniuose dažniausiai minimi šuoliniai, impulsiniai ir sinusiniai trikdžiai [10, 12]. Įvestas impulsinio arba sinusinio tipo trikdantis poveikis negrįžtamai paveiktų gamybos proceso kokybę arba jį visiškai sustabdytų, todėl karbamido sintezės kolonos technologinių parametrų tarpusavio sąryšį aprašančioms išraiškoms identifikuoti tikslingiausia panaudoti 5 pav. iliustruoto tipo šuolinį eksperimentą atitinkančius duomenis.



5 pav. Karbamido sintezės kolonoje planuojamo atlikti šuolinio eksperimento pavyzdys

2.1.3 Perdavimo funkcijų parametrų identifikavimo metodika

Atlikus 2.1.2 skyriuje aprašyto tipo šuolinį eksperimentą, gautų duomenų visiškai pakanka tiriamų parametrų perdavimo funkcijoms identifikuoti. Jas kombinuojant, galima sudaryti sintezės kolonoje susiformuojančio karbamido lydalo temperatūros reakcijos į sintezės cheminių reakcijų pradinių reaktantų srautų molinio santykio pokytį modelį.

Primityviausių procesų dinamiką geba aprašyti pirmosios eilės perdavimo funkcija su vėlavimu (9), o sudėtingesnėms trajektorijoms aproksimuoti, naudojama antrosios eilės funkcija su vėlavimu (10) arba dar sudėtingesnės formos išraiškos.

$$W_1(s) = \frac{K_{obj1}}{T_{obj1} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{obj1}s} \quad (9)$$

$$W_2(s) = \frac{K_{obj2}}{T_{obj2}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{obj2} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{obj2}s} \quad (10)$$

Čia $K_{obj1,2}$ – objekto stiprinimo koeficientas, $T_{obj1,2}$ – atstojamoji laiko pastovioji, $\tau_{obj1,2}$ – atstojamoji vėlinimo pastovioji, s – Laplaso operatorius.

Parametrų identifikavimo procedūrą suformulavus kaip optimizavimo uždavinį, minimizuojant kvadratinę nuokrypą (11), modelio vertes galima nustatyti pasirinktu optimizavimo metodu [13].

$$S = \sum_{i=1}^n (y_e(t_i) - y(t_i))^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

Sprendžiant identifikavimo uždavinį, atsižvelgiant į vyraujančios dinamikos eilę, patogu naudoti sprendinius:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & , \text{kai } 0 \leq t \\ K_{obj} \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{t-\tau_{obj}}{T_{obj}}\right)}\right) & < \tau_{obj} \\ & , \text{kait } \geq \tau_{obj} \end{cases} \quad (12)$$

$$y(t) = \begin{cases} 0 & , \text{kai } 0 \leq t \\ K_{obj} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t-\tau_{obj}}{T_{obj}}\right) \cdot e^{\left(-\frac{t-\tau_{obj}}{T_{obj}}\right)}\right) & < \tau_{obj} \\ & , \text{kait } \geq \tau_{obj} \end{cases} \quad (13)$$

Objekto stiprinimo koeficientams K_{obj} (12-13) nustatyti rekomenduojama naudoti išraišką:

$$K_{obj} = \frac{y(\infty)}{\Delta U} \quad (14)$$

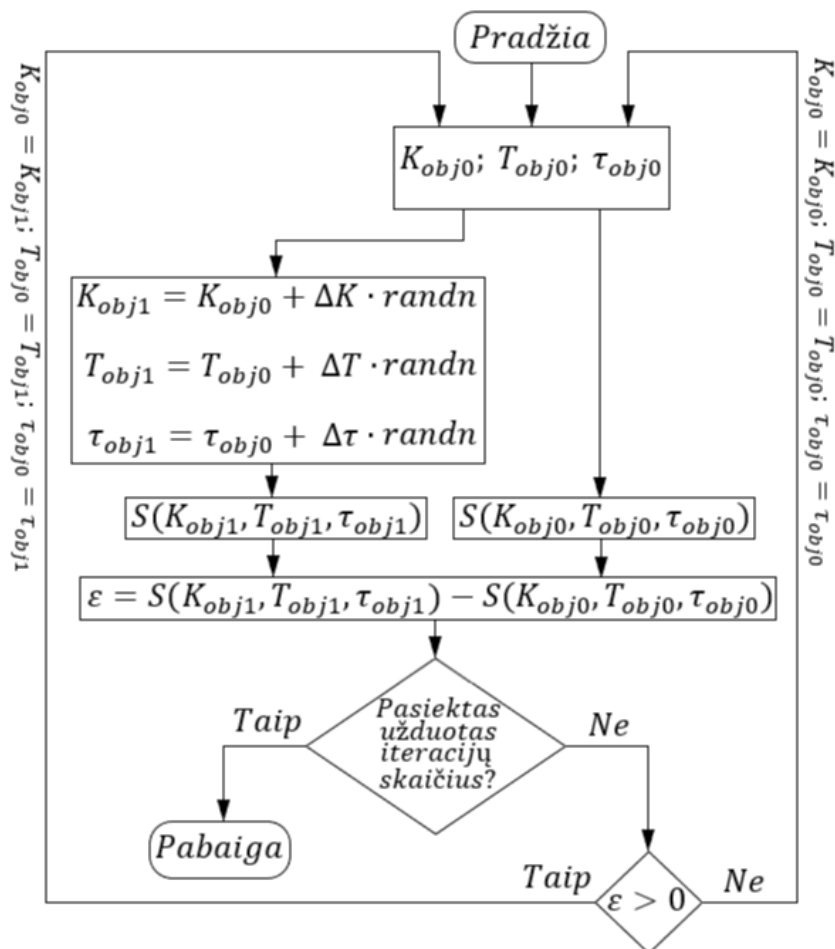
Čia K_{obj} – objekto stiprinimo koeficientas, $y(\infty)$ – nusistovėjusi parametro vertė, ΔU – valdymo parametro pokytis.

2.1.4 „Chemotaxis“ atsitiktinės paieškos metodo pritaikymas perdavimo funkcijų parametrų identifikavimo strategijai realizuoti

2.3 poskyryje (11–14) pateikta optimizavimo procedūra nesudėtinga, todėl perdavimo funkcijų (9–10) parametrus identifikuoti tinka dauguma optimizavimo metodų. Skaičiavimų apimtis šiuolaikiniams kompiuteriams problemų nebekelia, todėl perdavimo funkcijų parametrų reikšmėms nustatyti panaudotas dėl primityvios sandaros sklandžiu pritaikomumu daugumai primityvių optimizavimo uždavinių pasižymintis, tačiau kai kuriais atvejais daugybės iteracijų reikalaujantis „Chemotaxis“ atsitiktinės paieškos algoritmas.

Sudarant perdavimo funkcijoms identifikuoti pritaikytą 6 pav. pateiktą „Chemotaxis“ algoritmo versiją neprireikė sudėtingų matematinių operacijų, o jį realizuojant rašyti daugybės kodo eilučių.

Sudarytas algoritmas vieno ciklo metu geba nustatyti kelių parametrų optimumus, todėl idealiai tinka eksperimentinių rezultatų reikšmes aproksimuojančių perdavimo funkcijų parametrų optimizavimui vykdyti.



6 pav. „Chemotaxis“ metodo realizacijos algoritmas

2.2 Karbamido sintezės technologinio proceso valdymo metodų ir sistemų apžvalga

Pradinių reakcijos komponentų srautų santykio valdymo pagrindu sudarytai nuostato palaikymo sistemai realizuoti struktūriškai tinkamos tiesioginio/grįžtamojo ryšio ir pakopinė automatinio valdymo schemas. Jų pritaikymas karbamido sintezės kolonos ARS sudarymui, derinimo procedūra ir privalumai aprašyti šiame poskyriuje.

2.2.1 Automatinio valdymo sistemos kūrimo prielaidos

Atlikus 1 skyriuje aprašytą karbamido sintezės technologinio proceso analizę, įvertinus kokybinių parametrų įtaką procesui ir atsižvelgus į technologinio personalo pastabas, gamybos proceso efektyvumą geriausiai atspindinčiu dydžiu nutarta laikyti sintezės kolonoje susidarančio karbamido temperatūrą.

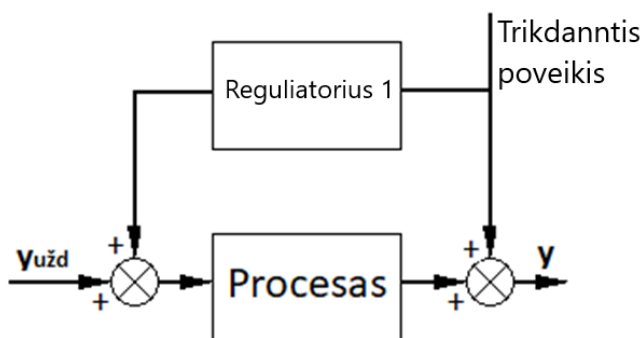
Vykstant sintezės reakcijoms apatinėje kolonos dalyje susidaro lydale, o viršutinėje – dujinės fazės karbamidas. Matavimo įtaisai, naudojami temperatūros monitoringui sumontuoti abiejose kolonos

sirtyse, todėl valdymo sistemą galima projektuoti lydalo arba dujų temperatūros nuostatui sekti. Peržiūrėjus šių parametrų kitimo grafikų archyvą, pastebėtas gerokai didesnis dujinės agregatinės būsenos karbamido temperatūros inertiškumas, todėl valdymo sistemos pagrindiniu valdomu parametru nuspręsta laikyti lydalo fazės temperatūrą.

Vienintelis būdas valdyti sintezės kolonos apatinės dalies užpildo temperatūrą – reguliuoti pradinių reaktantų srautų intensyvumo molinį santykį. Amoniakio tiekimo greičio pokyčius anglies dioksido tiekimo srauto dinamikos atžvilgiu praktiškai galima laikyti šuoliškais, todėl reikalinga automatinio valdymo sistema, gebanti neišbalansuojant technologinio proceso operatyviai kompensuoti NH_3 srauto intensyvumo pokyčius ir kokybiškai sekti lydalo temperatūros nuostatą.

2.2.2 Tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistema

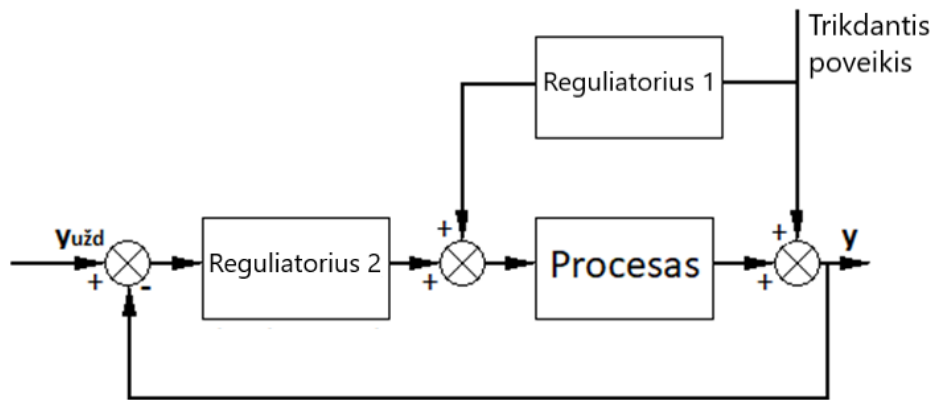
Valdymo forma, kai trikdančiųjų poveikių įtaka numatoma ir kompensuojama prieš jiems paveikiant objektą, o kompensavimui stebėti grįžtamojo ryšio kontūras nesudaromas, vadinama tiesioginio ryšio valdymu. Jo pagrindu sudaryta 7 pav. pateikta ARS vadinama tiesioginio ryšio arba trikdančio poveikio kompensavimo sistema.



7 pav. Tiesioginio ryšio reguliavimo sistemos schema

Neegzistuojant grįžtamojo ryšio kontūrai, pasikeitusios valdymo sąlygos gali labai pabloginti tokio tipo ARS valdymo kokybę, todėl kaip nepriklausomos valdymo sistemos jos naudojamos retai, dažniausiai itin primityvių objektų kontrolei [14].

Dėl anksčiau aprašytos galimo neigiamo tiesioginio ryšio reguliavimo sistemų poveikio proceso valdymo kokybei dažnai atvejais sudaromos 8 pav. pavaizduotos kombinuotos jų ir grįžtamojo ryšio kontūrų sistemos. Taip praktiškai eliminuojama tiesioginio ryšio valdymo grandies neigiamo poveikio tikimybė, išgaunamos didesnės proceso valdymo kokybinių parametrų vertės, nei naudojant pavienes valdymo sistemas.



8 pav. Tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, schema

Tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS derinama dviem etapais [13]:

1. Grįžtamojo ryšio kontūro reguliatorius „Regulatorius 1”, taikant pasirinktą vienkontūrės sistemos derinimo metodą, suderinamas kokybiškam nuostato $y_{užd}$ sekimui užtikrinti.
2. Kompensavimo grandies reguliatoriaus „Regulatorius 1” parametrai parenkami taip, kad jo įtaka trikdančiajam poveikiui būtų kuo artimesnė proceso modelio inversijai.

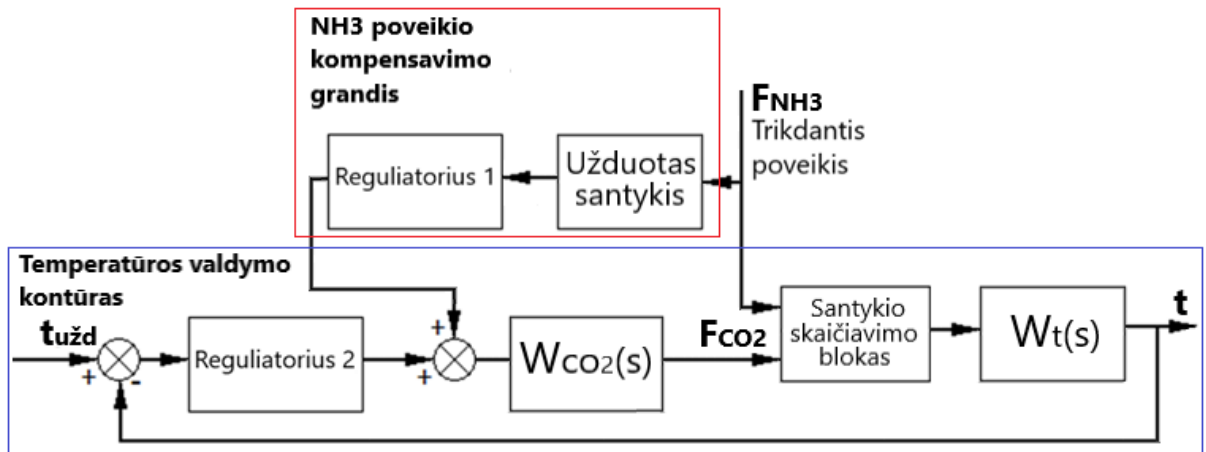
Valdymo sistemos modelio sudarymui taikant perdavimo funkcijas trikdančio poveikio įtakos perdavimo funkciją pažymėjus $W_{TP}(s)$, o proceso $W_P(s)$, visos kompensavimo grandies perdavimo funkcijos $W_K(s)$ išraišką galima užrašyti taip:

$$W_K(s) = -\frac{W_{TP}(s)}{W_P(s)} \quad (15)$$

2.2.3 Tiesioginio ryšio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti

Projektuojant 1.1.3 karbamido sintezės kolonos (žr. 9 pav.) automatinio valdymo sistemą pagal 2.2.2 skyriuje nagrinėtą tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos schemą pradinių reaktantų santykio skaičiavimo bloke įvestiems trikdantiems poveikiams kompensuoti panaudotas tiesioginis ryšys su santykio daugikliu ir „Regulatoriumi 1”, o pagrindiniu proceso kokybiniu kriterijumi laikomos karbamido lydalo temperatūros. Nuostato sekimui užtikrinti sudarytas grįžtamojo ryšio kontūras su PID reguliatoriumi.

Nepriklausomu kintamuoju, remiantis 2.2.1 skyriuje suformuluotomis valdymo sistemos kūrimo prielaidomis, laikomas NH_3 tekėjimo srautas F_{NH_3} , o karbamido lydalo temperatūra manipuluojama sumuojant grįžtamojo ryšio kontūro reguliatoriaus „Regulatorius 1“ valdančiojo poveikio ir tiesioginio ryšio grandies reguliatoriumi „Regulatorius 2“ kompensavimo signalus.

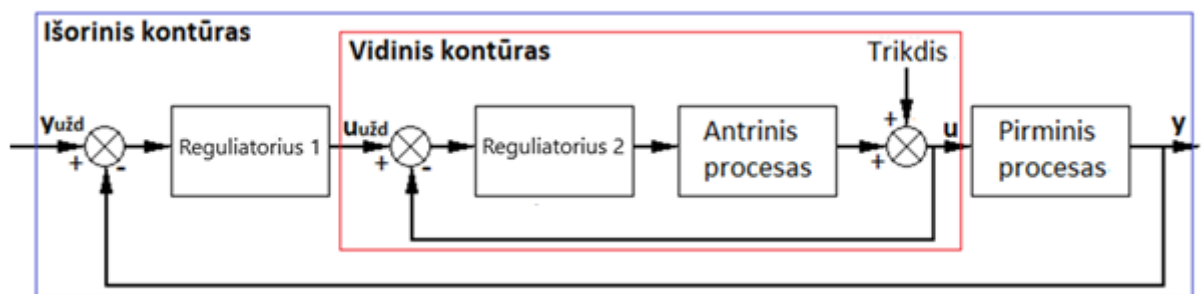


9 pav. Tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos schema pritaikyta automatiškai valdyti karbamido sintezės koloną. Mėlyna spalva pažymėtas temperatūros valdymo grįžtamojo ryšio kontūras, o raudona – trikdančio poveikio kompensavimo grandis.

2.2.4 Pakopinės sistemos pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti

Valdymo sistemos struktūra, kurią sudaro du grįžtamojo ryšio kontūrai (pakopos), o pirminio *master* reguliatoriaus išėjimas yra antrinio *slave* įėjimu, vadinamos pakopinėmis. Jos pagrindu sudaryta 10 pav. pateikta ARS vadinama kaskadine arba pakopine.

Dažniausiai vidinis kontūras pasitelkiamas dėl valdomo proceso parametrų svyravimų ar kitų pašalinių poveikių susidariusių ir antrinį procesą trikdantiems poveikiams kompensuoti, o išorinis – kokybiškai reakcijai į pirminio proceso nuostato pasikeitimus užtikrinti. Retesniais atvejais antrinis kontūras panaudojamas bendrai sistemos greitaveikai reguliuoti arba netiesinių procesų stiprinimo neatitikimams kompensuoti [14].



10 pav. Pakopinės automatinio valdymo sistemos schema. Mėlyna spalva pažymėtas išorinis, o raudona – vidinis kontūras.

Pakopinė reguliavimo sistema derinama dviem etapais [13]:

1. Vidinis *slave* kontūras suderinamas parinktu vienkontūrės sistemos derinimo metodu, pagrindiniu kriterijumi laikant greitą jo reakciją į pirminio reguliatoriaus sugeneruotą valdantįjį poveikį $u_{\text{žd}}$.
2. Įvertinus vidinio kontūro įtaką valdomam procesui, išorinis *master* kontūras taip pat suderinamas pasirinktu vienkontūrės sistemos derinimo metodu. Šiuo atveju pagrindiniu kriterijumi laikoma kokybiška sistemos reakcija į išorinio kontūro nuostato pasikeitimus $y_{\text{žd}}$.

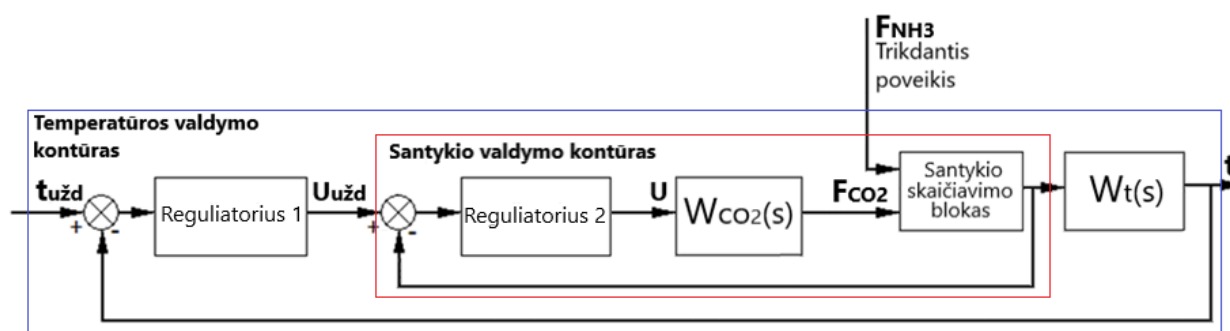
Vykdamt anksčiau aprašytą derinimo operaciją, kokybiškam ARS veikimui užtikrinti išoriniame kontūre būtina panaudoti PI arba PID struktūros reguliatorių, o vidiniam kontūriui valdyti dažnai pakanka paprastesnių P arba PI tipo reguliatorių.

2.2.5 Pakopinės sistemos pritaikymas karbamido sintezės kolonai valdyti

Sudarant 1.1.3 karbamido sintezės kolonos (žr. 11 pav.) automatinio valdymo sistemą pagal 2.2.4 skyriuje nagrinėtą pakopinės automatinio valdymo sistemos schemą, pradinių sintezės reakcijų komponentų srautui valdyti panaudotas vidinis grįžtamojo ryšio kontūras su reguliatoriumi „Regulatorius 1“, o kolonos žemutinio užpildo temperatūrai palaikyti –išorinis grįžtamojo ryšio kontūras su reguliatoriumi „Regulatorius 2“.

11 paveiksle matyti, kad temperatūra projektuojamoje pakopinėje valdymo sistemoje, kaip ir 3.3 skyriuje aprašytos kombinuotos sistemos atveju, tiesiogiai priklauso nuo F_{NH_3} ir F_{CO_2} srautų intensyvumo molinio santykio. Šiuo atveju nepriklausomu kintamuoju laikomo amoniako srauto pokyčiams kompensuoti 10 pav. pateiktoje shemoje naudotas tiesioginis ryšys papildytas grįžtamojo ryšio kontūru su PID reguliatoriumi.

Vidinio kontūro veikimą trikančiuoju poveikiu, remiantis 2.2.1 skyriuje suformuluotomis valdymo sistemos kūrimo prielaidomis, laikomas NH_3 tekėjimo srautas F_{NH_3} . Jo poveikiui kompensuoti integruotas srautų santykį valdantis „Regulatorius 1“. Esmei sudaromos valdymo sistemos užduočiai – temperatūros nuostato palaikymui atlikti, panaudotas išorinio kontūro reguliatorius „Regulatorius 2“.



11 pav. Pakopinės automatinio valdymo sistemos schema, pritaikyta automatiškai valdyti karbamido sintezės koloną. Mėlyna spalva pažymėtas išorinis temperatūros santykio valdymas, o raudona – vidinis.

2.3 Reguliatorių derinimo metodai

Chemijos pramonėje vykdomų technologinių procesų valdymo srityje dėl paprastos struktūros valdymo galimybių ir begalės pasiteisinusių naudojimo pavyzdžių jau kelis dešimtmečius yra nepakeičiami PID reguliatoriai. Šiame poskyriuje aprašoma 2.2 skyriuje aptarta suprojektuotų valdymo sistemų derinimui tinkamų metodų parinkimo procedūra ir jų taikymo metodika.

2.3.1 Temperatūros valdymo kontūro derinimo metodo parinkimas

Atlikus 1 skyriuje aprašytą karbamido sintezės technologinio proceso analizę, formuluojant 3.2.1 skyriaus automatinio valdymo sistemos kūrimo prielaidas, pagrindiniu suminės sintezės reakcijos

kokybės matu nustatyta joje susidarančio karbamido lydalo temperatūros vertė. 3.2.2 skyriuje aprašytos tiesioginio/grižtamojo ryšio, o 3.2.4 skyriuje – pakopinė schemas, pritaikius 3.2.3 ir 3.2.5 skyriuose aptartas schemas šio technologinio procesui valdyti, jų nuostatu laikomas šis dydis.

2.2.2 skyriuje aprašyta lydalo temperatūros įtaka sintezės kolonos išeigai nurodyta optimali – 161° C temperatūra ir paminėta, kad pasiekus 175° C, viena iš pagrindinių sintezės reakcijų smarkiai sulėtėtų, o peržengus 190° C ribą visiškai nustotų vykti. Net trumpalaikis ribinės temperatūros viršijimas gali negrižtamai paveikti technologinio proceso produktą, todėl pereinamo proceso kreivėse nuokrypį nuo užduotos vertės reikia sumažinti iki minimalaus arba jį visiškai eliminuoti.

Atsižvelgus į anksčiau pateiktus sistemos reakcijai keliamus reikalavimus, temperatūros kontūro derinimui nuspręsta naudoti Kappa-Tau metodą. Specifinis šio metodo PID regulatoriaus algoritmas suteikia galimybę parinkti sistemos jautrumą. Jo struktūroje įkomponuotas derinimo parametras, kuris suteikia galimybę keisti sistemos elgseną, neperderinus regulatoriaus parametrų. Šias savybes pritaikius projektuojamoms valdymo sistemoms, karbamido sintezės kolonoje galima išgauti maksimalią temperatūros kitimo greitaveiką, nepriartėjant prie jos ribinių verčių.

2.3.2 Pradinių reaktantų srautų molinio santykio valdymo kontūro derinimo metodo parinkimas

Pagal 2.2.1 skyriuje aptartas automatinio valdymo sistemos kūrimo prielaidas, pradinių reaktantų tiekimo sistemoje NH₃ tiekimo greičio pokyčius CO₂ tiekimo srauto dinamikos atžvilgiu galima laikyti šuoliškais, todėl 2.2.3 ir 2.2.5 aprašytos valdymo sistemos turi būti suderintos taip, kad amoniako srauto pokytis būtų greitai ir kokybiškai kompensuotas. Tiesioginio/grižtamojo ryšio sistemoje kompensavimui panaudotas tiesioginis ryšys, o pakopinėje – vidinis kontūras. Pirmuoju atveju derinimui naudojama modelio inversija, todėl nuo santykio derinimo kontūro metodo parinkimo priklauso tik pakopinės ARS valdymo kokybė.

Nors 1.1.2 skyriuje amoniako pertekliaus susidarymas aprašytas kaip sintezės reakcijų kokybės tiesiogiai neveikiantis veiksnys, kolonos viduje nusistovėjusi, nauja NH₃:CO₂ santykio pusiausvyra dėl žemo temperatūros valdymo kontūro jautrumo ilgainiui įneštų pagrindinio proceso kokybinio kriterijaus – karbamido lydalo temperatūros pokytį, kuris neigiamai paveiktų produkto išeigą, todėl itin svarbu pasiekti didelį trikdančiojo poveikio kompensavimo greitaeigiškumą.

Įvertinus anksčiau aprašytus sistemos reakcijai keliamus reikalavimus, pradinių reaktantų molinio santykio kontūro derinimui nuspręsta taikyti Cohen ir Coon taisyklės, sudarytas laikantis aukšto jautrumo kriterijaus, todėl garantuoja itin greitą reakciją. Nors dėl šios savybės realių objektų valdymui keliamus reikalavimus jos atitinka retai, vis dėlto didelei santykio kontūro reakcijos greitaveikai užtikrinti minėtos taisyklės turėtų puikiai tikti.

2.3.3 Pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrų identifikavimas

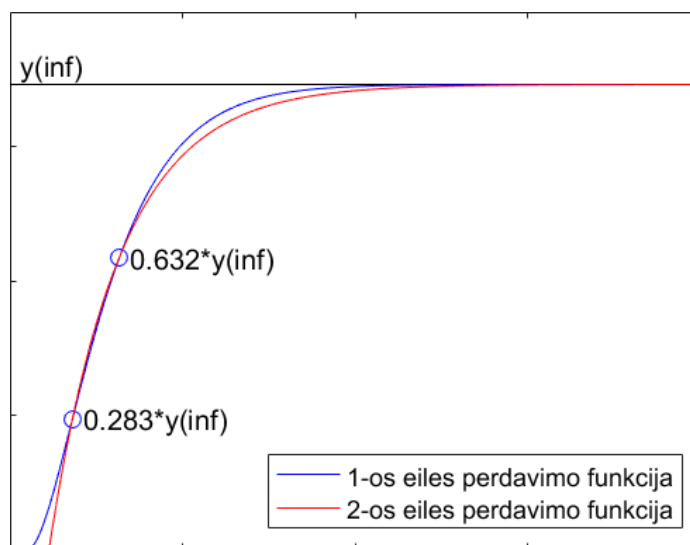
Derinant PID reguliatorius 4.2–4.5 poskyriuose aprašytais metodais, parametrus galima nesudėtingai išskaičiuoti iš nevaldomos pereinamojo proceso kreivės pirmosios eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu (9) charakteristikų – K_{pr} , T_{pr} , τ_{pr} .

Sudėtingesnės dinamikos procesai aprašomi aukštesnėmis (10) nei pirmosios eilės perdavimo funkcijomis, todėl eksperimentinio tyrimo metu identifikuotas perdavimo funkcijų išraiškas ne visada įmanoma iš karto tiesiogiai pritaikyti reguliatorių derinimui. Nustačius aukštesnės eilės dinamiką, pagal (15–18) Smito [13, 15] taisyklės perskaičiuotus funkcijos vertes galima ją perkvalifikuoti į pirmosios eilės ekvivalentą (žr. 12 pav.) ir taip išvengti kito metodo paieškų. Vykdam perskaičiavimą, pirmiausia pagal (15–16) formules apskaičiuojamos $y(t_1)$ ir $y(t_2)$ vertės nustatomi laiko momentai t_1 ir t_2 :

$$y(t_1) = 0,283 \cdot y(\infty) \rightarrow t_1 \quad (16)$$

$$y(t_2) = 0,632 \cdot y(\infty) \rightarrow t_2 \quad (17)$$

Čia $y(\infty)$ – skirtumas tarp pradinės ir galinės funkcijos šuolinės reakcijos verčių, $y(t_1)$ ir $y(t_2)$ funkcijos vertės laiko momentais (t_1) ir (t_2).



12 pav. Antrosios eilės perdavimo funkcijos ir Smito metodu perskaičiuoto pirmosios eilės ekvivalento grafikai. Čia $y(inf)$ atitinka (16–17) naudojamą $y(\infty)$.

Nustačius laiko momentų t_1 ir t_2 vertes, pagal (18–19) išraiškas perskaičiuojamos perdavimo funkcijos charakteristikos T_{pr} , τ_{pr} :

$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (18)$$

$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr} \quad (19)$$

Čia T_{pr} , τ_{pr} – pirmos eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu (10) laiko pastoviosios ir vėlavimo vertės. Stiprinimui apskaičiuoti, nepaisant proceso dinamikos eilės, naudojama (14) formulė, todėl perskaičiavimo procedūros atlikti nereikia.

2.3.4 Cohen ir Coon metodas

Ziegler ir Nichols sudarė du klasikinius (šuolinės ir dažninės reakcijų) reguliatorių derinimo metodus. Dvidešimto amžiaus viduryje suformuluotais derinimo principais paremtos patobulintos jų modifikacijos gali būti efektyviai taikomos ir šiandieninėms automatinio reguliavimo sistemoms derinti.

Pagrindiniu šių metodų privalumu laikomas derinimo operacijos paprastumas, o trūkumu – santykinai mažo pradinės amplitudės slopinimo įnešama jautri reakcija į valdomo proceso parametrų pokyčius. Pirmasis autorių metodas yra paremtas grafiniu proceso charakteristikų nustatymu iš nevaldomo pereinamojo proceso kreivės. Nubrėžus jai stačiausią galimą liestinę, nustatomos kreivės charakteristikos, pagal kurias, remiantis Ziegler ir Nichols sudarytomis taisyklėmis, išskaičiuojamos reguliatoriaus parametrų vertės [16].

Dažninės reakcijos metodas dar vadinamas antruoju Ziegler ir Nichols arba jautrumo metodu. Derinant jautrumo metodu, būtina galimybė eksperimentuoti su valdomu objektu arba jo modeliu. Eliminavus visas reguliatoriaus dedamąsias, išskyrus P, stiprinimo koeficientas koreguojamas, kol reakcijos į šuolinį trikdį kreivėje įsivyrąja pastovios amplitudės svyravimai. Stiprinimo koeficiento reikšmė, kurią naudojant jie buvo pasiekti ir susidariusių svyravimų periodas, priimami ribinėmis vertėmis, kurios, atliktus perskaičiavimo procedūrą, konvertuojamos į reguliatoriaus parametrus [16]. Pagal klasikinius Ziegler ir Nichols reguliatorių derinimo metodus parametrai nustatomi remiantis dviem proceso dinaminėmis charakteristikomis. Automatinio valdymo erai išibėgėjus, pradėta ieškoti būdų išgauti geresnius valdymo kokybės parametrus. Išskelta hipotezė, teigianti, kad reguliatorius, kurio derinamų parametrų vertėms apskaičiuoti panaudotos daugiau nei dvi dinaminės charakteristikų vertės, pagerintų valdomo pereinamojo proceso kokybę.

Vieni iš pirmųjų žingsnių ta kryptimi žengė Cohen ir Coon. Jų taisyklių rinkinyje (žr. 3 lentelė) derinamoms reguliatoriaus parametrų vertėms nustatyti panaudoti trys proceso dinamiką aprašantys dydžiai. Autoriams pavyko išgauti kokybiškesnes valdymo charakteristikas, tačiau išliko per didelio jautrumo problema, todėl metodas nebuvo plačiai taikomas.

Kuriant automatinio valdymo sistemą 2.1.2 skyriuje aprašyto eksperimentinio tyrimo metu identifiukuotos modeliuojamo proceso valdomų parametrų dinamiką aprašančios perdavimo funkcijos, todėl reguliatoriams derinti būtų patogiau naudoti pirmosios eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu parametrų – K_{pr} , T_{pr} , τ_{pr} pagrindu pagal Ziegler-Nichols derinimo principus sudarytas (žr. 3 lentelę) Cohen ir Coon reguliatoriaus parametrų skaičiavimo formules. Atlikus eksperimentus ir aptikus aukštesnę nei pirmos eilės dinamiką, perdavimo funkcijos parametrus galima perskaičiuoti pagal 2.2.1 skyriuje pateiktą metodiką.

3 lentelė. Cohen ir Coon reguliatorių parametrų derinimo formulės

Regulatorius	Parametras	Derinimo formulė
P	K_r	$\frac{T_{pr}}{K_{pr} \cdot \tau_{pr}} \cdot \left(1 + \frac{\tau_{pr}}{3 \cdot T_{pr}}\right)$
PI	K_r	$\frac{T_{pr}}{K_{pr} \cdot \tau_{pr}} \cdot \left(0,91 + \frac{\tau_{pr}}{12 \cdot T_{pr}}\right)$
	T_i	$\frac{30 + 3 \cdot \tau_{pr}/T_{pr}}{9 + 20 \cdot \tau_{pr}/T_{pr}} \cdot \tau_{pr}$
PID	K_r	$\frac{T_{pr}}{K_{pr} \cdot \tau_{pr}} \cdot \left(1,33 + \frac{\tau_{pr}}{4 \cdot T_{pr}}\right)$
	T_i	$\frac{32 + 6 \cdot \tau_{pr}/T_{pr}}{13 + 8 \cdot \tau_{pr}/T_{pr}} \cdot \tau_{pr}$
	T_d	$\frac{4}{11 + 2 \cdot \tau_{pr}/T_{pr}} \cdot \tau_{pr}$

2.3.5 Kappa ir Tau metodas

Kappa-Tau, kaip ir Cohen-Coon metodika, paremta skaičiavimais su trimis proceso dinaminėmis charakteristikomis. Autoriai sudarė šuoline ir dažnine proceso reakcijomis grįstas metodo versijas, kurios atrastos, tiriant dominuojančio polio metodo pritaikymo tipiniams procesų modeliams simuliacijas [17].

Šiame skyriuje (20–27) išnagrinėtas ir tolimesniuose projekto vystymo etapuose reguliatoriams derinti naudotas tik šuolinės reakcijos metodas, kuriuo nustatyti reguliatoriaus parametrai pritaikyti specifiniam PID algoritmui:

$$u(t) = K_r \cdot \left[(b \cdot y_{nuost} - y) + \frac{1}{T_i} \int (y_{nuost} - y) dt - T_d \cdot \frac{dy}{dt} \right] \quad (20)$$

Įprastai efektyviai trikdžius kompensuojančios sistemos „įneša“ santykinai žymų perreguliuojimą sekant nuostatą. Įvestas parametras b leidžia nepriklausomai suderinti reguliatorių abiem atvejais.

Derinimo procedūrai atlikti reikalingos pirmosios eilės perdavimo funkcija išreikšto proceso modelio charakteristikos, kurios (reguliatoriaus parametru skaičiavimams atlikti) naudotos ir 2.3.4 skyriuje aptartame Cohen ir Coon metode, analogiškai gali būti identifikuotos pasitelkus 2.3.3 sk. aprašytą Smito metodiką.

Pirminiame derinimo etape (20–21) formulėmis apskaičiuotos normuoto reguliatoriaus vėlavimo τ ir α vertės:

$$\alpha = K_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) \quad (21)$$

$$\tau = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} \quad (22)$$

Nustačius τ ir α vertes pagal parinktą jautrumą M_s (tipinės vertės 1,4 ir 2,0) ir reguliatorių (PI arba PID) iš lentelių (žr. 4, 5 lentelės) išrinktos a_0 , a_1 , a_2 reikšmės, parametru $\alpha K_r, T_i/T_{pr}$, T_d/T_{pr} skaičiavimui ir tipinis derinimo parametro b dydis.

4 lentelė. PI reguliatorių derinimui Kappa-Tau metodu reikalingų charakteristikų vertės

	Derinimo parametru vertės		
	a_0	a_1	a_2
Jautrumas	$M_s = 1,4$		
αK_r	0,29	-2,7	3,7
T_i/T_{pr}	0,79	-1,4	2,4
b	0,81	0,73	1,9
Jautrumas	$M_s = 2,0$		
αK_r	0,78	-4,1	5,7
T_i/T_{pr}	0,79	-1,4	2,4
b	0,44	0,78	-0,45

5 lentelė. PID reguliatorių derinimui Kappa-Tau metodu reikalingų charakteristikų vertės

	Derinimo parametrų vertės		
	a_0	a_1	a_2
Jautrumas	$M_s = 1,4$		
αK_r	3,8	-8,4	7,3
T_i/T_{pr}	0,46	2,8	-2,1
T_d/T_{pr}	0,077	5,0	4,8
b	0,40	0,18	2,8
Jautrumas	$M_s = 2,0$		
αK_r	8,4	-9,6	9,8
T_i/T_{pr}	0,28	3,8	-1,6
T_d/T_{pr}	0,076	3,4	-1,1
b	0,22	0,65	0,051

Parinkus a_0 , a_1 , a_2 vertes, $\alpha K_r, T_i/T_{pr}$, T_d/T_{pr} dydžiai skaičiuojami pagal (22–24) formules:

$$\alpha K_r = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} \quad (23)$$

$$T_i/T_{pr} = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} \quad (24)$$

$$T_d/T_{pr} = a_0 \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) \quad (25)$$

Įvertinus $\alpha K_r, T_i/T_{pr}$, T_d/T_{pr} didumą, specifinio PI(D) reguliatoriaus algoritmo derinimo parametrai nustatomi pagal (25–27) išraiškas:

$$K_r = \frac{\alpha K_r}{\alpha} \quad (26)$$

$$T_i = (T_i/T_{pr}) \cdot T_{pr} \quad (27)$$

$$T_d = (T_d/T_{pr}) \cdot T_{pr} \quad (28)$$

Nustatant reguliatoriaus parametrus Kappa-Tau metodu tarpiniams skaičiavimams (22–24) atlikti naudojamų dydžių vertės varijuoja (žr. 4, 5 lenteles), priklausomai nuo reguliatoriaus tipo ir parinkto jautrumo M_s . Tipinės parametro vertės yra 1,4 ir 2,0; pagal didesnę jo reikšmę sudarytomis taisyklėmis suderintos sistemos pasižymi spartesne reakcija, todėl yra laikomos jautresnėmis. Parinkus tinkamą M_s vertę, valdymo sistemoje galima įvesti nejautrumą proceso dinaminių parametrų svyravimams ir taip eliminuoti pagrindinį 2.3.4 skyriuje paminėtą klasikinių reguliatorių derinimo metodų trūkumą – per jautrią reakciją į jų pasikeitimus. Tokia savybė itin pravarti derinant įvairiose pramonės srityse pasitaikančius objektus, kurių dinaminės charakteristikos dažnai kinta dėl nekontroliuojamų vyksmų poveikio.

2.4 Adaptyvusis valdymas

Įprastais metodais suderintai sistemai pritrūkus tikslumo, aukštesnei valdymo kokybei išgauti pasitelkiamas adaptyvusis valdymas. Ši sąvoka automatinio valdymo sistemų kūrimo procese siejama

su stiprinimo numatymo ir nuolatinės parametų adaptacijos algoritmais. Karbamido sintezės kolonos parametų dinamikos pasikeitimų duomenys prieinami iš anksto, todėl nepavykus pasiekti norimos valdymo kokybės, būtų tikslinga sukurti stiprinimo numatymo algoritmą.

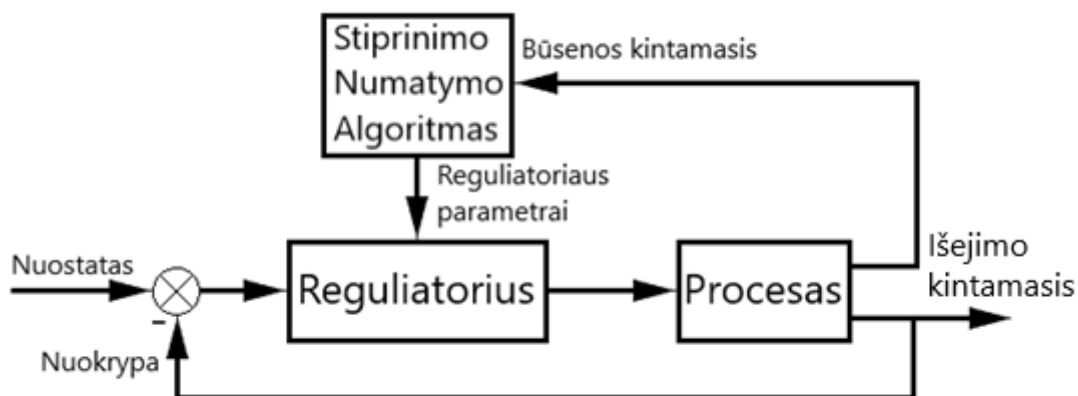
2.4.1 Stiprinimo numatymas

Stiprinimo numatymu paremtas adaptyviojo valdymo algoritmas taikomas sistemoms, kurių dinamika priklauso nuo būsenos, derinti. Remiantis literatūra, išskiriamos šuolinius reguliatoriaus parametų pokyčius vykdančios ir jų vertės interpoliuojančios sistemos. Egzistuoja karbamido sintezės kolonos dinamiką tiksliai apibūdinantis kriterijus, todėl poskyriuje aprašyta ir vėliau adaptacijai panaudota tik šuoliškai parametrus keičianti sistema.

Kiekvienam žinomam valdomos sistemos darbo režimui sudarius po individualų reguliatoriaus parametų rinkinį, jie rotuojami pagal režimo dinaminis pokyčius atspindinčio būsenos kintamojo vertę. Tokiu kintamuoju gali būti parinktas reguliatoriaus manipuluojamas signalas ar vienas iš proceso kintamųjų, o rotacija vykdoma jo kitimo intervalams priskyrus geriausias pereinamojo proceso savybes toje srityje užtikrinantį reguliatoriaus parametų derinį.

Taikant stiprinimo numatymą, žymus valdymo kokybės pagerėjimas gali būti pasiektas net ir tada, kai panaudoti tik keli reguliatoriaus parametų deriniai [13].

Stiprinimo numatymo paremtos valdymo sistemos (žr. 13 pav.). blokinė schema sudaryta prie klasikinio grįžtamojo ryšio valdymo kontūro tiesioginiu ryšiu prijungus stiprinimo numatymo algoritmo bloką. Nors jo pavadinimas sufleruoja apie reguliatoriaus stiprinimo dedamosios numatymą, koreguojamos gali būti ir integravimo bei diferencijavimo parametų vertės.



13 pav. Adaptivos, stiprinimo numatymu paremtos valdymo sistemos blokinė schema

2.4.2 Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymo karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemoms prielaidos

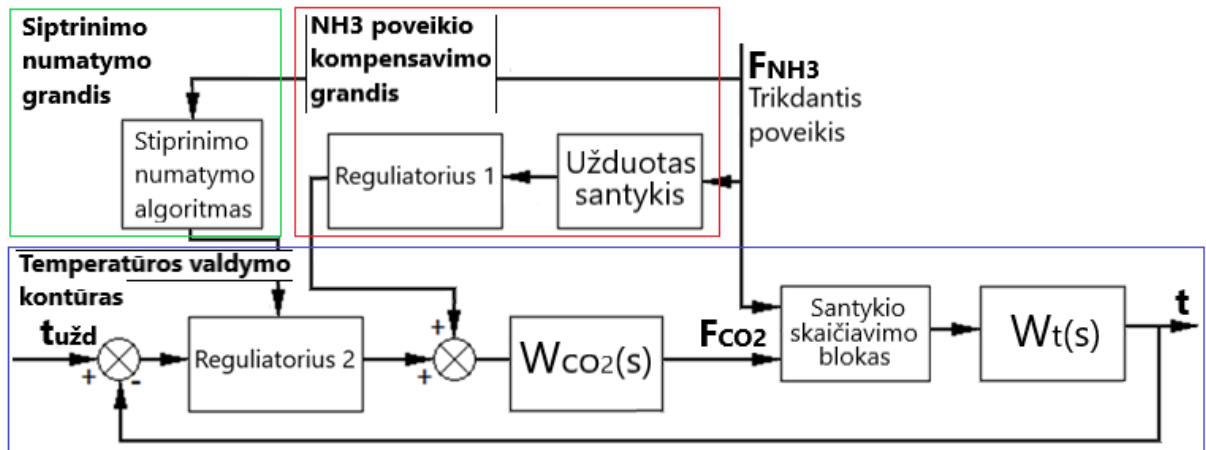
Kertinio sintezės kokybinio kriterijaus – temperatūros inertiškumas – tiesiogiai priklauso nuo kolonos apkrovimo, todėl kintant jos užpildymui, realūs ir proceso dinamikos pokyčiai.

Suprojektuotose ir sintezės kolonos valdymui pritaikytose 2.2.3, 2.2.5 automatinio valdymo sistemų schemose matyti, kad kolonos apkrova tiesiogiai reguliuojama keičiant amoniako srauto pratekėjimą,

o anglies dioksido tiekimo sistema tik seka jo pokyčius, todėl temperatūros kitimo dinamikos pasikeitimus atspindinčių parametru reiktų laikyti amoniako srautą.

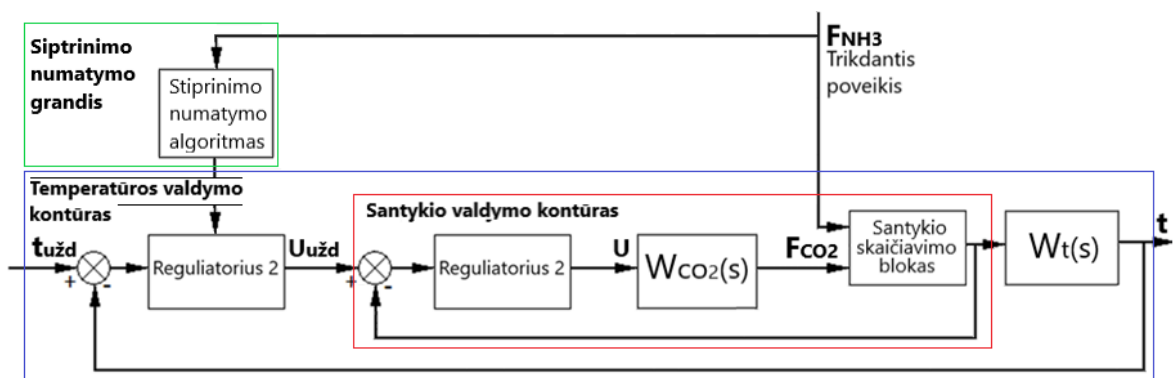
2.4.3 Stiprinimo numatymo algoritmo įvedimas karbamido sintezės automatinio valdymo sistemoms

Stiprinimui numatyti tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos schemoje įvestas papildomas tiesioginio ryšio kontūras, kuriuo (žr. 14 pav., pažymėta žalia spalva) stiprinimo numatymo algoritmo realizavimo blokas prijungtas prie PID regulatoriaus. Atsižvelgus į 2.4.2 skyriuje aptartas prielaidas, temperatūros valdymo kontūro būsenos parametru priimta NH_3 srauto intensyvumo vertė.



14 pav. Adaptivios tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, schema, pritaikyta karbamido sintezės kolonos automatiniam valdymui

Analogiška anksčiau aprašytai tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS procedūra atlikta pakopinės valdymo sistemos schemoje. Įvestas papildomas tiesioginio ryšio kontūras, kuriuo (žr. 15 pav., pažymėta žalia spalva) stiprinimo numatymo algoritmo realizavimo elementas prijungtas prie temperatūros valdymo kontūro regulatoriaus. Kaip ir 14 pav. iliustruotoje schemoje, temperatūros valdymo kontūro būsenos parametru priimta NH_3 srauto didumo vertė.



15 pav. Adaptivios pakopinės automatinio valdymo sistemos schema, pritaikyta karbamido sintezės kolonos automatiniam valdymui

3 Projektinė dalis

3.1 Karbamido sintezės kolonos eksperimentinis tyrimas

3.1.1 Šuolinės reakcijos eksperimentas perdavimo funkcijoms nustatyti

Į sintezės koloną plūsta dideli NH_3 (iki $60 \text{ m}^3/\text{h}$) ir CO_2 (iki $10000 \text{ m}^3/\text{h}$) srautai, o jų santykio pokytis gali negrįžtamai paveikti gamybos ciklą, todėl perdavimo funkcijų nustatymui panaudoti, keičiant gamybos intensyvumą, surinkti duomenys.

Didinant kolonos apkrovą, anglies dioksido grįžtamo srauto valdymo įtaiso pravėrimo laipsnis pakeistas $36 \rightarrow 47 \%$. Užfiksuoti (žr. 6 lentelę) anglies dioksido srauto intensyvumo ir sintezės kolonos (žr. 7 lentelę) užpildo temperatūros verčių pokyčiai. Duomenys iš esmės atitiko 3.1.2 skyriuje (žr. 5 pav.) aprašytą šuolinį eksperimentą ir buvo panaudoti 4.1.2 karbamido sintezės proceso pereinamųjų procesų dinamiką aprašančių perdavimo funkcijų $W_{\text{CO}_2}(s)$ ir $W_t(s)$ eilei nustatyti ir parametrams identifikuoti.

6 lentelė. Šuolinio eksperimento rezultatų, vykdant projektinės apkrovos technologinį procesą, pirmoji dalis. CO_2 tiekimo srauto intensyvumo reakcija į grįžtamo srauto valdymo įtaiso pravėrimo laipsnio pokytį

Šuolio amplitudė	Eksperimento numeris, n	Laikas, h	Išmatuota $F_{\text{CO}_2(n)}$ vertė, m^3/h	$F_{\text{CO}_2(n)} - F_{\text{CO}_2(1)}$, m^3/h
$\Delta u = 11 \%$	1	0,000	6301,020	0,000
	2	0,125	6531,428	230,408
	3	0,250	6661,726	360,706
	4	0,375	6848,770	547,750
	5	0,500	6854,264	553,244
	6	0,625	6968,292	667,272
	7	0,750	6976,108	675,088
	8	0,875	6951,087	650,067
	9	1,000	6956,711	655,691
	10	1,125	6993,224	692,204
	11	1,250	6983,081	682,061
	12	1,375	6985,220	684,200
	13	1,500	6993,249	692,229
	14	1,625	7017,553	716,533
	15	1,750	7005,457	704,437
	16	1,875	7000,982	699,962

7 lentelė. Šuolinio eksperimento rezultatų, vykdant projekcinės apkrovos technologinį procesą, antroji dalis. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį

Santykio pokytis	Matavimo numeris, n	Laikas, h	Išmatuota t(n) vertė, °C	t(n)-t(1), °C
$\Delta u = -0,387$	1	0	138,043	0,000
	2	0,5	138,043	0,000
	3	1,0	139,165	1,122
	4	2,0	141,688	3,645
	5	3,0	147,309	9,266
	6	4,0	151,264	13,221
	7	5,0	151,766	13,723
	8	6,0	153,030	14,987
	9	7,0	154,244	16,201
	10	8,0	153,221	15,178
	11	9,0	154,606	16,563
	12	10,0	154,941	16,898
	13	11,0	153,855	15,812
	14	12,0	154,476	16,433

6, 7 lentelės duomenys surinkti, fiksuojant parametrų reikšmes, esant vidutinei ($F_{NH_3} = 38 \text{ m}^3/\text{h}$) apkrovai. Tokiu režimu objektas veikia didžiąją laiko dalį, todėl ji sudarant ARS modelius laikyta projektine. Pagrindinio valdomo parametro – temperatūros pereinamojo proceso dinamikos pokyčiams, kintant gamybos intensyvumai, įvertinti, surinkti papildomi duomenys. Kolonai veikiant didesniu nei projektinis ($F_{NH_3} = 47 \text{ m}^3/\text{h}$) apkrovimu (žr. 8 lentelė) ir vykdant mažiau intensyvių ($F_{NH_3} = 28 \text{ m}^3/\text{h}$) nei įprastai gamybos procesą (9 lentelė).

8 lentelė. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį vykdant didesnės nei projekcinė apkrovos technologinį procesą

Santykio pokytis	Matavimo numeris, n	Laikas, h	Išmatuota t(n)vertė, °C	t(n)-t(1), °C
$\Delta u = -0,312$	1	0	145,842	0
	2	0,5	145,842	0
	3	1,0	146,264	0,422
	4	2,0	147,987	2,145
	5	3,0	151,308	5,466
	6	4,0	153,423	7,581
	7	5,0	156,165	10,323
	8	6,0	157,363	11,521
	9	7,0	156,796	10,954
	10	8,0	157,465	11,623
	11	9,0	157,925	12,083
	12	10,0	157,005	11,163
	13	11,0	157,371	11,529
	14	12,0	157,269	11,427

9 lentelė. Karbamido lydalo temperatūros reakcija į pradinių reaktantų srautų santykio pokytį vykdant mažesnės nei projektinė apkrovos technologinį procesą

Santykio pokytis	Matavimo numeris, n	Laikas, h	Išmatuota t(n)vertė, °C	t(n)-t(1), °C
$\Delta u = -0,413$	1	0	138,836	0,000
	2	0,5	139,636	0,800
	3	1,0	143,018	4,182
	4	2,0	150,081	11,245
	5	3,0	155,702	16,866
	6	4,0	157,724	18,888
	7	5,0	158,261	19,425
	8	6,0	159,268	20,432
	9	7,0	158,137	19,301
	10	8,0	159,294	20,458
	11	9,0	157,604	18,768
	12	10,0	158,734	19,898
	13	11,0	158,747	19,911
	14	12,0	159,066	20,230

3.1.2 Perdavimo funkcijų identifikavimo procedūra

Anglies dioksido srauto intensyvumo $W_{CO_2}(s)$ perdavimo funkcijos stiprinimo komponentėms vertei (29) apskaičiuoti panaudota (14) formulė.

$$K_{CO_2} = \frac{698,910}{11} = 63,537 \frac{m^3}{h} \quad (29)$$

Karbamido sintezės kolonos automatinio valdymo sistemų modeliuose amoniako srauto intensyvumas įvedamas kaip šuoliškai kintantis dydis, todėl sudarant $NH_3:CO_2$ tiekimo molinio santykio skaičiavimo grandis dėl reakcijos pradinių komponentių srautų tiekimo dinamikos perteikimo kompleksiskumo skirtumų susidaro neapibrėžtumų. Siekiant jų išvengti, ARS modeliuose temperatūros valdymui panaudotas atvirkščias santykis $CO_2:NH_3$.

Nusprendus naudoti atvirkščią santykį šuolinių eksperimentų metu nustatyti santykio pokyčiai buvo perskaičiuoti. Atliekant šuolinį eksperimentą, projektine apkrova veikiančios kolonos temperatūros perdavimo funkcijos $W_{t22}(s)$ identifikavimui sintezės reakcijos pradinių reaktantų santykis pakito:

$$4,213 \rightarrow 3,826; \Delta = -0,387$$

Perskaičiuojant nustatytas atvirkščių santykio reikšmių pokytis:

$$4,213^{-1} = 0,237 \rightarrow 3,826^{-1} = 0,261; \Delta = 0,024$$

Analogiškos perskaičiavimo procedūros atliktos neprojektinės apkrovos režimais veikusios kolonos temperatūros perdavimo funkcijų $W_{t21}(s), W_{t23}(s)$ šuolinių eksperimentų metu nustatytiems santykio pokyčiams.

Pasitelkus tokią pat skaičiavimo metodiką kaip (29) atveju (30–32) apskaičiuotos sintezės kolonoje susidariusio karbamido lydalo temperatūros $W_{t21}(s), W_{t22}(s), W_{t23}(s)$ perdavimo funkcijų stiprinimo parametrų vertės.

$$K_{t21} = \frac{11,652}{0,019} = 613,263 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (30)$$

$$K_{t22} = \frac{16,134}{0,024} = 672,250 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

$$K_{t23} = \frac{20,821}{0,027} = 751,148 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (32)$$

$W_{CO_2}(s)$ ir $W_{t21}(s), W_{t22}(s), W_{t23}(s)$ dinamiką aprašančių laiko pastoviųjų ir vėlinimų vertėms (žr. 10 lentelę) nustatyti pasitelktas sudarant 3.1.3 perdavimo funkcijų parametrų identifikavimo strategiją parinktas ir 3.1.4 aprašytas „Chemotaxis” paieškos metodas. Atlikus 6–9 lentelėse pateiktų duomenų analizę, nuspręsta CO_2 srauto intensyvumo kitimo pereinamajam procesui priskirti pirmosios, o karbamido sintezės kolonos viduje susidarancio lydalo temperatūros elgsenai aukštesnės antrosios eilės dinamiką, todėl pirmu atveju nustatant perdavimo funkcijos vertes panaudotas (12), antru (13) sprendinys. Visas anglies dioksido perdavimo funkcijos parametrų indentifikavimui naudotas *Matlab* programos kodas pateiktas pirmajame, o temperatūros – antrajame prieduose.

10 lentelė. Identifikuotos anglies dioksido srauto intensyvumo $W_{CO_2}(s)$ ir sintezės kolonoje susidariusio karbamido lydalo temperatūros $W_{t21}(s), W_{t22}(s), W_{t23}(s)$ perdavimo funkcijų parametrų vertės

Darbo režimas		Parametrai		
Perdavimo funkcija	$F_{NH_3}, \text{ m}^3/\text{h}$	K_{obj}	T_{obj}	τ_{obj}
$W_{CO_2}(s)$	-	$63,537 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	0,287	–
$W_{t21}(s)$	< 38	613,263 $^\circ\text{C}$	1,352	0,521
$W_{t22}(s)$	≥ 38 < 47	672,250 $^\circ\text{C}$	1,255	0,410
$W_{t23}(s)$	≥ 47	751,148 $^\circ\text{C}$	1,057	0,187

10 lentelės $W_{CO_2}(s)$ ir $W_{t21}(s), W_{t22}(s), W_{t23}(s)$ eilučių vertes užrašius pagal (9–10) formas (33–36) gautos tokios perdavimo funkcijų išraiškos:

$$W_{CO_2}(s) = \frac{63,537}{0,287 \cdot s + 1} \quad (33)$$

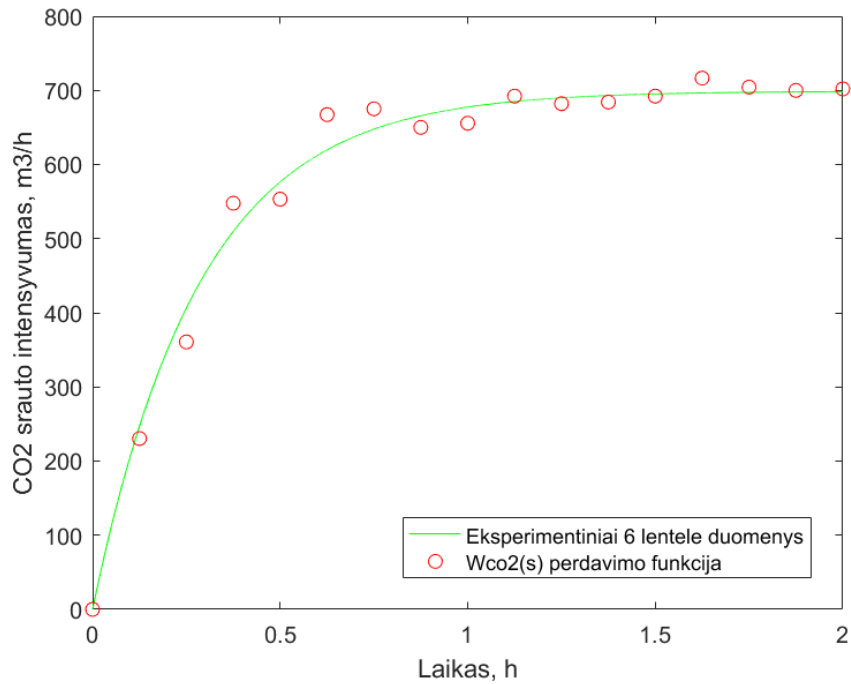
$$W_{t21}(s) = \frac{613,263}{1,828 \cdot s^2 + 2,704 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,521 \cdot s} \quad (34)$$

$$W_{t22}(s) = \frac{672,250}{1,575 \cdot s^2 + 2,510 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,410 \cdot s} \quad (35)$$

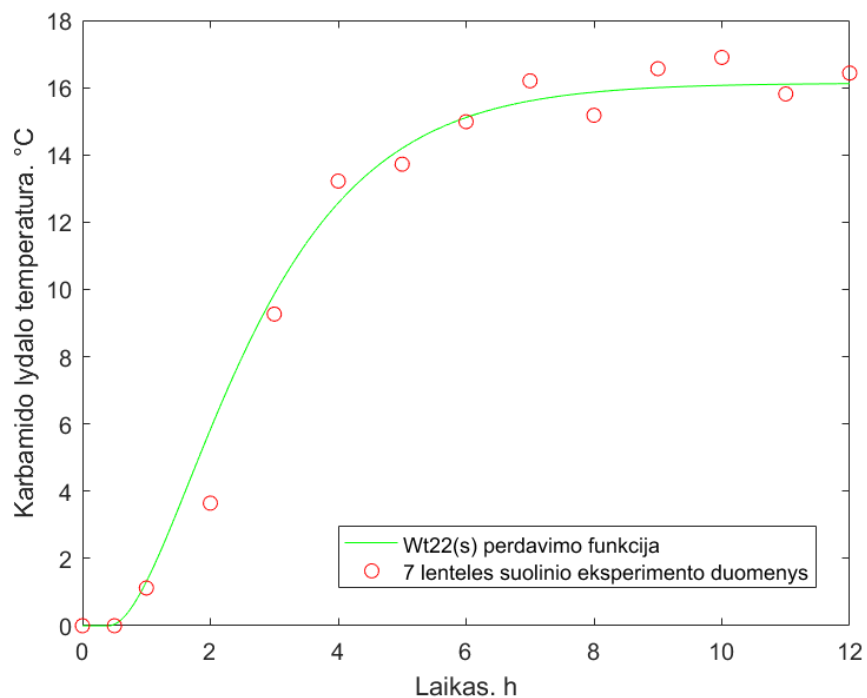
$$W_{t23}(s) = \frac{751,148}{1,117 \cdot s^2 + 2,114 \cdot s + 1} \cdot e^{-0,187 \cdot s} \quad (36)$$

3.1.3 Modeliuojamų ir eksperimentinių parametrų verčių palyginimas

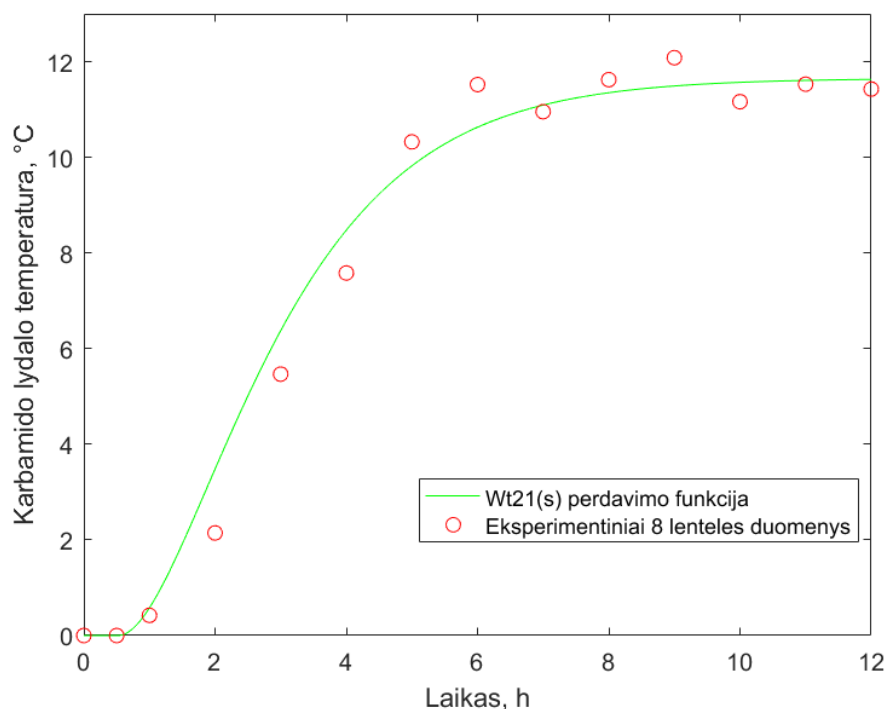
Anglies dioksido srauto intensyvumo (33) ir sintezės kolonoje susidariusio karbamido lydalo temperatūros (34, 35, 36) perdavimo funkcijų aproksimuojamos kreivės su eksperimentiniais 6–9 lentelių duomenimis grafiškai palygintos 16–19 paveiksluose.



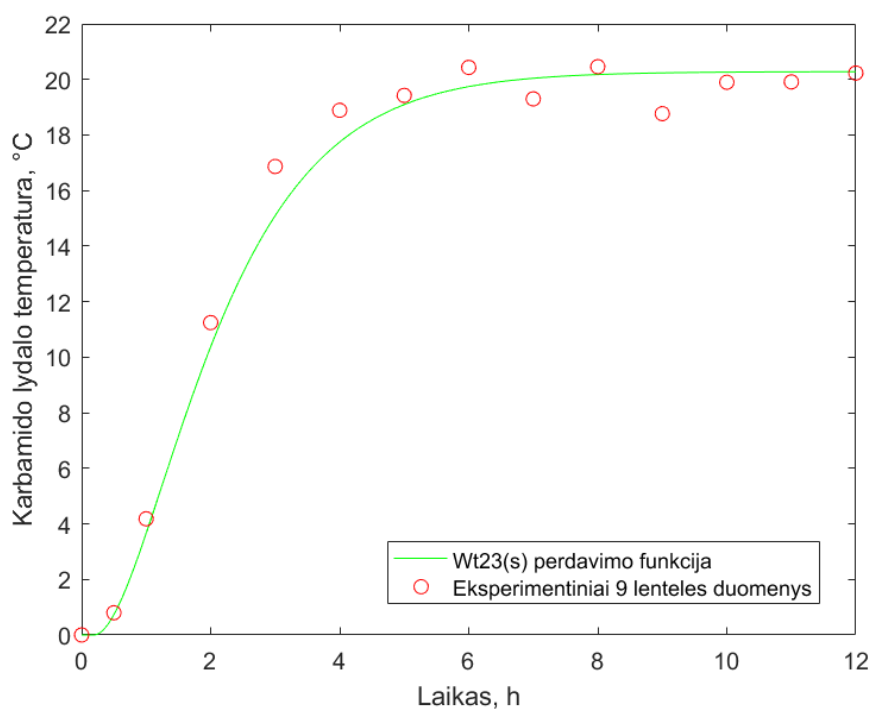
16 pav. Eksperimentinių (žr. 6 lentelę) reikšmių ir $W_{CO_2}(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas



17 pav. Eksperimentinių (žr. 7 lentelę) reikšmių ir $W_{t22}(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas



18 pav. Eksperimentinių (8 lent.) reikšmių ir $W_{t21}(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas



19 pav. Eksperimentinių (žr. 9 lentelę) reikšmių ir $W_{t23}(s)$ aproksimuojamos kreivės palyginimas

Identifikuotų (žr. 10 lentelę) perdavimo funkcijų reakcijos idealiai neatitiko eksperimentinių reikšmių, tačiau aproksimacijos kreivių ir eksperimentinių duomenų kitimo tendencijos sutapo, todėl perdavimo funkcijų išraiškos priimtos pakankamai tiksliai 4.2.1 skyriuje aprašyto karbamido sintezės kolonos modelio sudarymui.

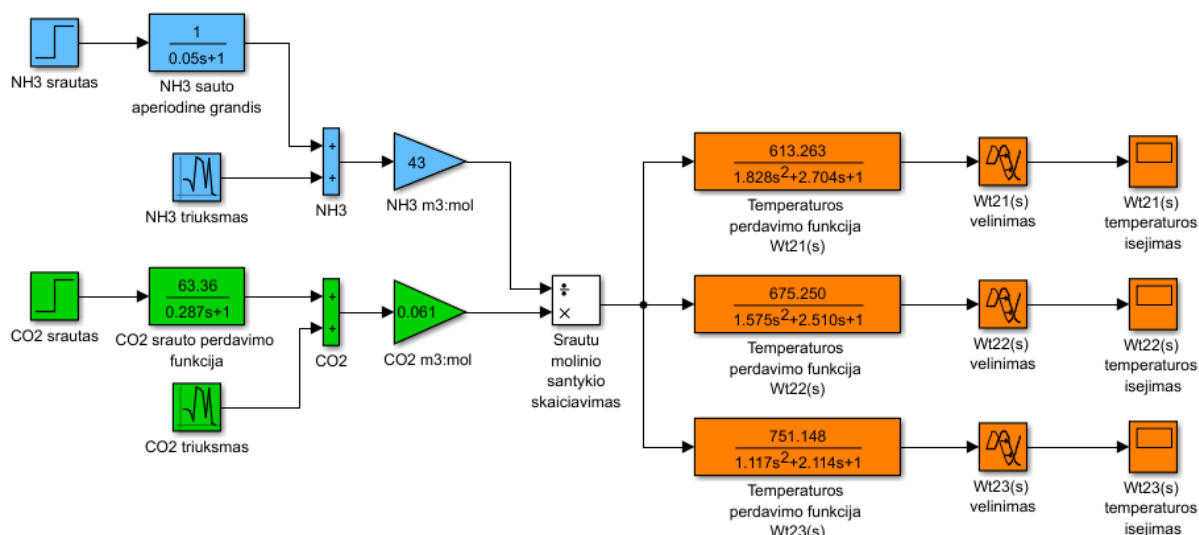
3.2 Valdymo sistemų modelių sudarymas ir derinimas

3.2.1 Karbamido sintezės kolonos modelio sudarymas

CO₂ tiekimo sistemai, kuri 20 pav. išskirta žalia spalva, modeliuoti naudota (33) perdavimo funkcija. Prieš patenkant į tiekiamų srautų molinio santykio skaičiavimo bloką, prie jos išėjimo dar pridėtas triukšmo įtaką imituojantis santykinai mažos amplitudės atsitiktinis signalas, o susumuota vertė iš įprastinių srauto matavimo vienetų m³/h konvertuota į molinio santykio nustatymui reikalingus mol/h.

NH₃ srauto intensyvumas CO₂ atžvilgiu kinta šuoliškai, todėl jo kitimą vaizduojančiai 20 pav. mėlynos spalvos elementais pateiktai grandžiai perdavimo funkcija nebuvo identifikuota. Vietoj jos tikslesniam realaus šuolio perteikimui panaudota aperiodinė grandis, kurios laiko pastoviosios vertė (0,05) yra nedidelė. Prieš jungiant į tiekimo srautų molinio santykio skaičiavimo bloką, aperiodinės grandies išėjimo trajektorijai būtinas atlikti analogiškas kaip ir CO₂ atveju perskaičiavimas.

Apskaičiuotas pradinių reaktantų molinis santykis patenka į 20 pav. oranžine spalva pažymėtus (34–36) karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų įėjimus. Jų išėjimams pagal 10 lentelėje nurodytą τ stulpelį įvedus vėlinimo vertes gautos galutinės modeliuojamo objekto išėjimo kreivės.



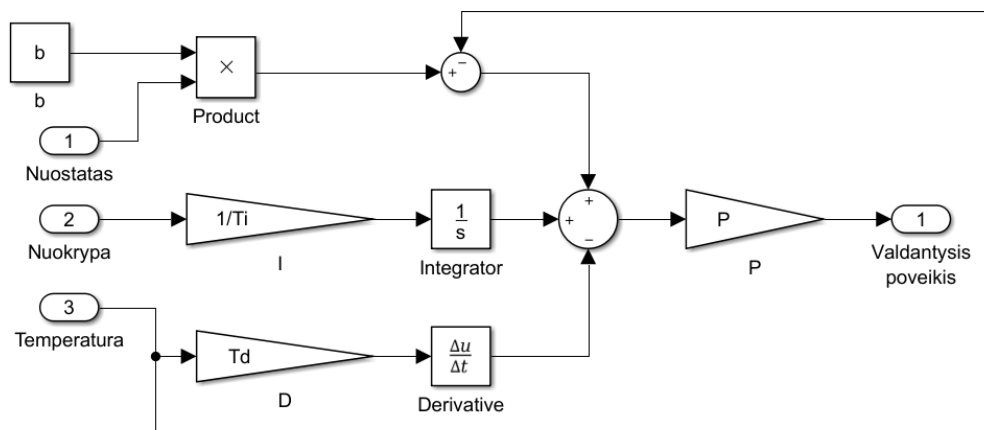
20 pav. Perdavimo funkcijomis paremtas karbamido sintezės kolonos modelis

3.2.2 Tiesioginio ryšio automatinio valdymo sistemos, paremtos grįžtamoju ryšiu, modelio sudarymas ir derinimas

Šiame skyriuje detalai aprašyta tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos modelio sudarymo ir derinimo projektinėms sąlygoms procedūra. Didelio ir žemo intensyvumo sistemų derinimo rezultatai pateikti 3.2.4 skyriuje.

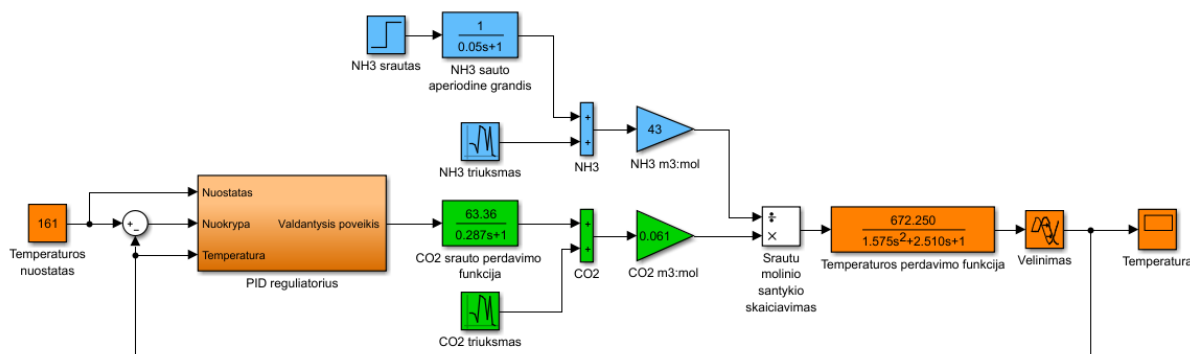
Prioritetinė modeliuojamos ARS užduotis – užtikrinti kokybišką temperatūros nuostato palaikymą. Jai įgyvendinti 2.2.3 pritaikant tiesioginio/grįžtamojo ryšio schemą, sintezės kolonos valdymui nuspręsta panaudoti grįžtamojo ryšio kontūrą, kurio derinimui dėl 2.3.1 parenkant derinimo metodą įvardintų priešasčių parinktas Kappa-Tau metodas (jo derinimo procedūra detalai aprašyta 2.3.5 skyriuje).

Tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos formavimo procedūra pradėta nuo pagal specifinę (20) struktūrą suprojektuoto 21 pav. pateikto PID reguliatoriaus modelio sudarymo.



21 pav. Specifinės formos Kappa-Tau PID reguliatoriaus modelis. Čia b – derinimo parametras, T_i – integruojančios, o T_d – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji, P – reguliatoriaus stiprinančiosios dedamosios daugiklis

20 pav. pateiktam modeliui įvedus grįžtamojo ryšio kontūrą, 21 pav. iliustruotas struktūros PID reguliatorius 22 pav. vaizduojamas karbamido lydalų temperatūrai valdyti.



22 pav. Pirminės, grįžtamoju ryšiu paremtos automatinio valdymo sistemos modelis

Temperatūros valdymo kontūro reguliatoriaus parametrų derinimo operacijai Kappa-Tau metodu atlikti reikalingo pirmosios eilės su vėlinimo grandimi išraiškos $W_{t12}(s)$ modelio indentifikavimui iš aukštesnės eilės perdavimo funkcijos $W_{t22}(s)$ atlikti (37–40) naudotas 2.3.3 skyriuje detalai aprašytas skaitmeninis *Smito* metodas.

$$y(t_1) = 0,283 \cdot 1,590 = 0,450 \rightarrow t_1 = 1,992 \text{ val.} \quad (37)$$

$$y(t_2) = 0,632 \cdot 1,590 = 1,005 \rightarrow t_2 = 3,389 \text{ val.} \quad (38)$$

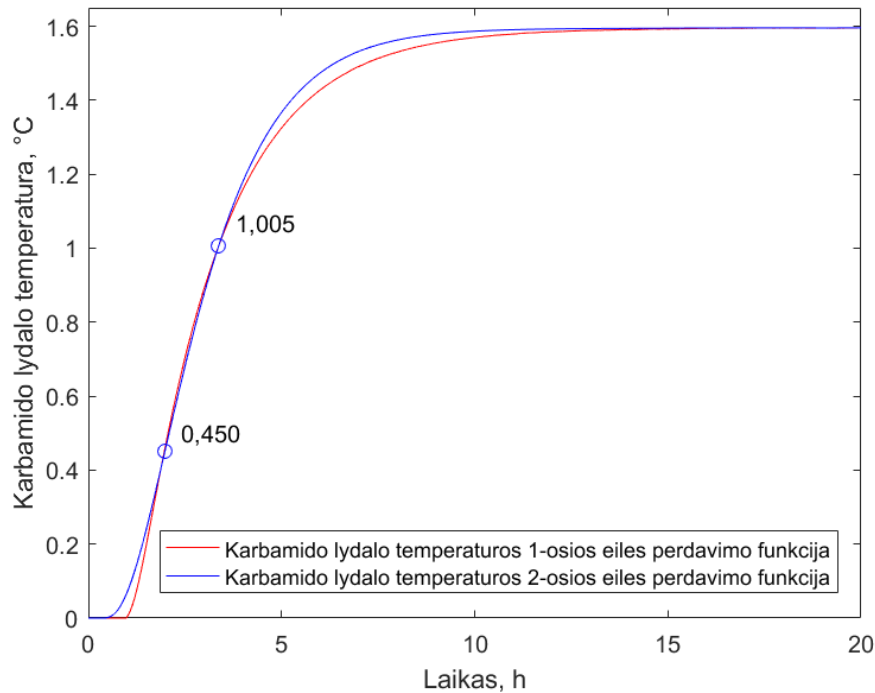
$$T_{t12} = \frac{3}{2} (3,389 - 1,992) = 2,096 \text{ val.} \quad (39)$$

$$\tau_{t12} = 3,389 - 2,096 = 1,293 \text{ val.} \quad (40)$$

Nustatytas pirmosios eilės modelio parametrų vertes užrašius (9) forma (41) gauta $W_{t21}(s)$ perdavimo funkcijos išraiška:

$$W_{t21}(s) = \frac{672,250}{2,096 \cdot s + 1} \cdot e^{-1,288 \cdot s} \quad (41)$$

Naujai sudaryto (41) ir pradinio (35) modelio 23 pav. iliustruota reakcija į identišką įėjimo signalą nesutapo idealiai, tačiau išgauti tikslesnį aukštesnės dinamikos atvaizdavimą, naudojant pirmosios eilės perdavimo funkciją, būtų sudėtinga, todėl aproksimacija priimta kaip tinkama reguliatoriaus derinimo parametrų nustatymo operacijai atlikti.



23 pav. 2-osios ir 1-osios eilės karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų palyginimas

Pasitelkus identifikuotos $W_{t1}(s)$ perdavimo funkcijos dinamines charakteristikas (T_{t1} ir τ_{t1}), taikant 2.3.5 skyriuje aprašytą Kappa-Tau metodiką, (42–49) apskaičiuoti 22 pav. vaizduojami temperatūros valdymo kontūro specifinės (žr. 21 pav.) struktūros PID reguliatoriaus parametrai. 2.2.1 ARS kūrimo prielaidose ir 2.3.1 parenkant reguliatoriaus derinimo metodą pabrėžta neigiama didelio sistemos jautrumo įtaka procesui, derinant panaudotos žemesniam sistemos jautrumui ($M_s = 1,4$) sudarytos (žr. 5 lentelę) taisyklės.

$$\alpha = K_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) = 1,590 \cdot \frac{1,293}{2,097} = 0,980 \quad (42)$$

$$\tau = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} = \frac{1,293}{1,293 + 2,097} = 0,381 \quad (43)$$

$$\alpha K_r = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 3,8 \cdot e^{-8,4 \cdot 0,381 + 7,3 \cdot 0,381^2} = 0,477 \quad (44)$$

$$K_r = \frac{\alpha K_r}{\alpha} = \frac{0,477}{0,980} = 0,487 \quad (45)$$

$$T_i/T_{pr} = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 0,28 \cdot e^{3,8 \cdot 0,381 + (-1,6) \cdot 0,381^2} = 0,943 \quad (46)$$

$$T_i = (T_i/T_{pr}) \cdot T_{pr} = 0,943 \cdot 2,097 = 1,977 \quad (47)$$

$$T_d/T_{pr} = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 0,076 \cdot e^{3,4 \cdot 0,381 + (-1,1) \cdot 0,381^2} = 0,236 \quad (48)$$

$$T_d = (T_d/T_{pr}) \cdot T_{pr} = 0,236 \cdot 2,097 = 0,496 \quad (49)$$

Tiesioginio ryšio kontūro valdymo signalo perdavimo funkcijos $W_k(s)$ išraiška, skirtą 22 pav. iliustruotai karbamido lydalo temperatūros grįžtamojo ryšio valdymo sistemos schemai, nustatyta pritaikius 2.2.2 aprašytą trikdančiojo kompensavimo grandies sudarymo metodiką. Šiuo atveju proceso modelio dalį $W_p(s)$ sudaro (50) iš molinio srauto 0,061 ir santykio k_{sant} koeficientų padauginta $W_{CO_2}(s)$ ir nuosekliai prijungta $W_t(s)$ perdavimo funkcija. Kadangi amoniako srauto dinamikai aprašyta tik aperiodinė grandis, kurios įtaka pereinamajam procesui dėl itin mažos laiko pastoviosios vertės (0,005) priimta kaip nereikšminga, trikdžio dalies modelį $W_d(s)$ sudaro iš molinio srauto 43 ir santykio k_{sant} koeficientų padauginta $W_t(s)$.

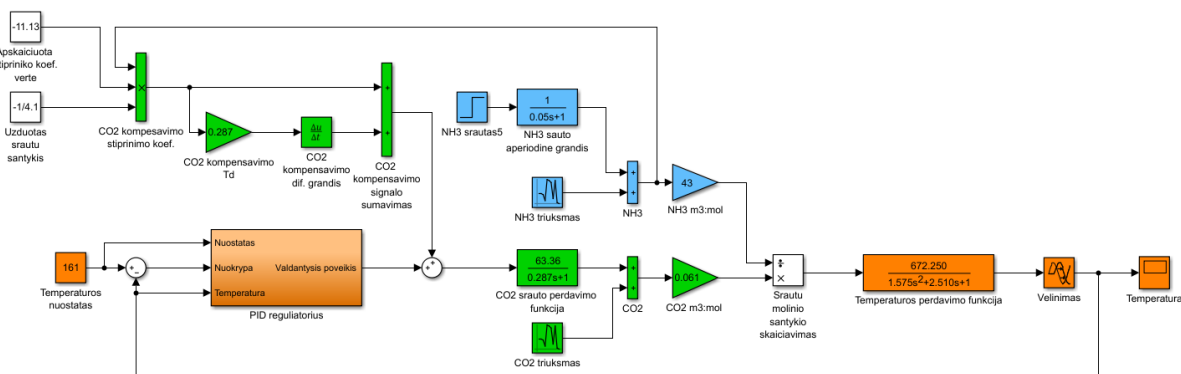
$$W_p(s) = W_{CO_2}(s) \cdot 0,061 \cdot k_{sant} \cdot W_t(s) \quad (50)$$

$$W_d(s) = 43 \cdot k_{sant} \cdot W_t(s) \quad (51)$$

Surašius $W_p(s)$ ir $W_d(s)$ išraiškas į (15) $W_k(s)$ formą ir suprastinus gautą perdavimo funkciją, (52) nustatyta trikdžio kompensavimo grandies perdavimo funkcija $W_k(s)$.

$$W_k(s) = -\frac{W_d(s)}{W_p(s)} = -\frac{43 \cdot k_{sant} \cdot W_t(s)}{W_{CO_2}(s) \cdot 0,061 \cdot k_{sant} \cdot W_t(s)} = -11,095 \cdot (0,287 \cdot s + 1) \quad (52)$$

Kadangi 24 pav. iliustruotame ARS modelyje tiesioginio ryšio grandimi kompensuojamas srautų molinio santykio pokytis prieš sumuojant su PID regulatoriaus valdančiuoju poveikiu kompensavimo kontūro signalui įvestas užduoto srautų santykio vertę atitinkantis daugiklis, o $W_k(s)$ atvaizdavimui panaudota idealaus PD regulatoriaus struktūra.



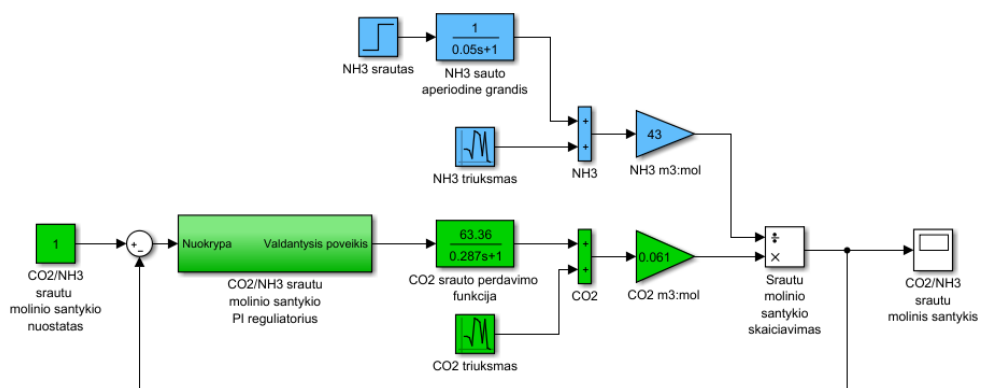
24 pav. Tiesioginiu/grįžtamoju ryšiu paremtos automatinio valdymo sistemos modelis

3.2.3 Pakopinės valdymo sistemos modelio sudarymas ir derinimas

Šiame skyriuje detalai aprašyta pakopinės valdymo sistemos modelio sudarymo ir derinimo projektinėms sąlygoms procedūra. Didelio ir žemo intensyvumo sistemų derinimo rezultatai pateikti 3.2.4 skyriuje.

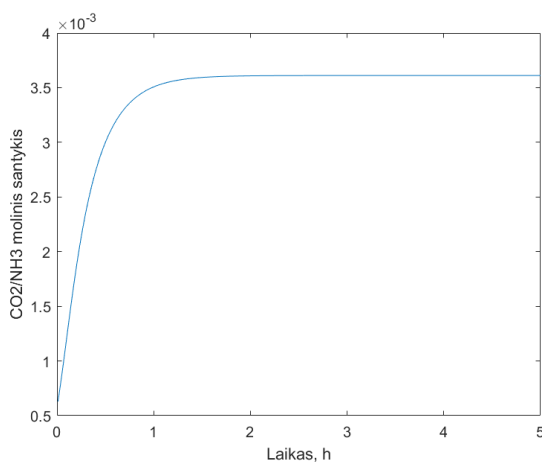
Pakopinės valdymo sistemos modelio sudarymo procedūra pradėta nuo 25 pav. iliustruoto vidinio kontūro sudarymo. Jis sudarytas 3.2.1 skyriuje aprašytai karbamido sintezės kolonos modelio pradinių reaktantų srautų molinio santykio skaičiavimo sistemai įvedus grįžtamąjį ryšį ir panaudojus reguliatorių. 2.2.4 skyriuje pateiktame pakopinės valdymo sistemos derinimo procedūros aprašyme teigiama, kad vidiniam kontūrai valdyti dažniais atvejais pakanka P arba PI regulatoriaus, o

literatūroje [18] minima, kad statistiškai srautų valdymui daugeliu atveju panaudoti PI reguliatoriai, todėl nuspręsta pirmiausia išbandyti sistemos veikimą, naudojant reguliatorių be diferencijuojančios dedamosios.



25 pav. Pakopinės valdymo sistemos vidinio pradinių sintezės reaktantų srautų molinio santykio kontūro modelis

25 pav. ARS modelyje atjungus reguliatorių ir grįžtamojo ryšio grandį, derinimui atliktas 26 pav. pavaizduotos vienetinės šuolinės reakcijos eksperimentas.



26 pav. Šuolinis eksperimentas, atliktas pradinių sintezės reaktantų valdymo kontūro derinimo parametrms nustatyti

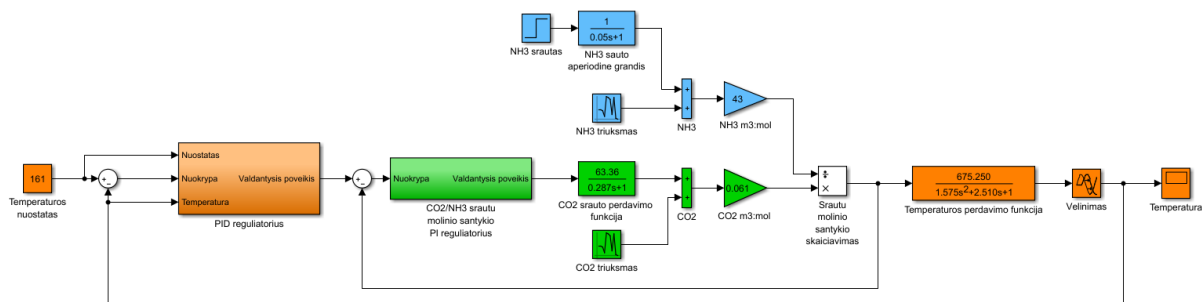
Gauta nevaldomo pereinamojo proceso kreivė panaudota santykio pirmosios eilės su vėlinimu perdavimo funkcijai nustatyti. Jos stiprinimas K_{pr} prilygintas nusistovėjusios pereinamojo proceso kreivės vertei 0,0036, panaudota $W_{CO_2}(s)$ laiko pastovioji T_{pr} . Vėlinimo grandžių karbamido sintezės kolonos modelyje nėra, todėl reguliatoriaus parametrų skaičiavimui nuspręsta naudoti nedidelę, praktiškai nereikšmingą 0,01 didumo τ_{pr} vertę.

PI reguliatoriaus derinimui (53–54) panaudotos 2.3.4 Cohen ir Coon išvestos ir pirmosios eilės su vėlinimu modeliui pritaikytos formulės, kurios pateiktos 3 lentelėje.

$$K_r = \frac{0,287}{0,0036 \cdot 0,01} \cdot \left(0,91 + \frac{0,01}{12 \cdot 0,287}\right) = 7278 \quad (53)$$

$$T_i = \frac{30 + 3 \cdot 0,01/0,287}{9 + 20 \cdot 0,01/0,287} \cdot 0,01 = 0,031 \quad (54)$$

Suderinus vidinį srautų santykio valdymo kontūrą, 24 pav. pavaizduotame valdymo sistemos modelyje įvestas išorinis grįžtamojo ryšio kontūras su PID reguliatoriumi. Taip sudaryta 27 pav. iliustruota pakopinė temperatūros valdymo sistema.



27 pav. Pakopinės karbamido lydalo temperatūros valdymo sistemos modelis

Atjungus temperatūros valdymo sistemos dalį, atliktas šuolinis eksperimentas srautų santykio valdymo kontūro įtakos temperatūros kitimui įvertinti (55–58). Atlikus analogiškas 2.2.2 skyriuje atliktoms tiesioginio/grįžtamojo ryšio sistemą skaičiavimo operacijas identifiukuotas pirmos eilės reakcijos su vėlinimo grandimi išraiškos pereinamojo proceso (59) modelis.

$$y(t_1) = 0,283 \cdot 675,248 = 191,095 \rightarrow t_1 = 1,721 \text{ val.} \quad (55)$$

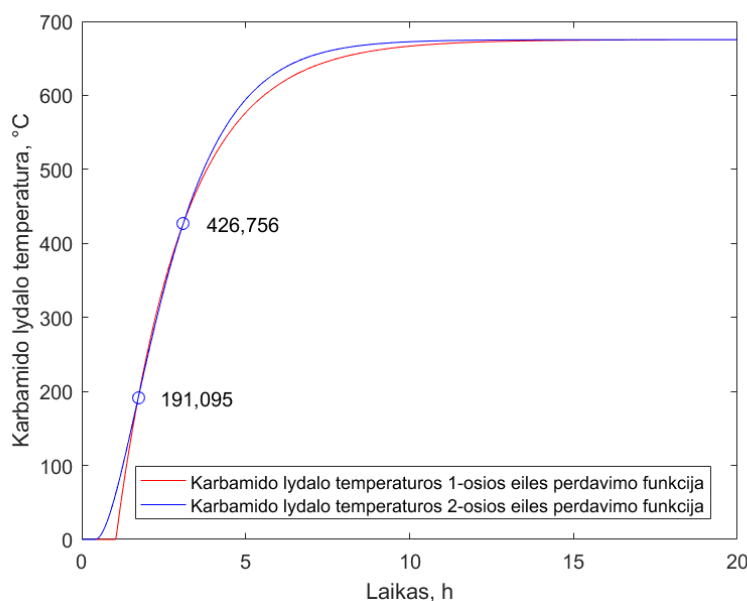
$$y(t_2) = 0,632 \cdot 675,248 = 425,756 \rightarrow t_2 = 3,095 \text{ val.} \quad (56)$$

$$T_{t12} = \frac{3}{2}(3,095 - 1,721) = 2,061 \text{ val.} \quad (57)$$

$$\tau_{t12} = 3,095 - 2,061 = 1,034 \text{ val.} \quad (58)$$

$$W_{t12}(s) = \frac{675,250}{2,061 \cdot s + 1} \cdot e^{-1,034 \cdot s} \quad (59)$$

Naujai sudaryto (59) ir pradinio (35) modelio 28 pav. iliustruota reakcija į identišką įėjimo signalą, kaip ir derinant tiesioginio/grįžtamojo ryšio sistemą, nesutapo idealiai, tačiau dėl 13.2.2 skyriuje įvardintų priežasčių aproksimacija priimta kaip tinkama regulatoriaus derinimo parametrų nustatymo operacijai atlikti.



28 pav. 2-osios ir 1-osios eilės karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų palyginimas

Identifikuoto pirmosios eilės modelio su vėlinimo grandimi perdavimo funkcijos parametrai panaudoti (60–68) PID regulatoriaus parametrų nustatymui Kappa-Tau metodu. 3.2.1 ARS kūrimo prielaidose ir 3.3.1 parenkant regulatoriaus derinimo metodą pabrėžta neigiama didelio sistemos jautrumo įtaka procesui, derinant panaudotos žemesniam sistemos jautrumui ($M_s = 1,4$) sudarytos taisyklės (žr. 5 lentelę).

$$\alpha = K_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) = 675,248 \cdot \frac{1,034}{2,061} = 338,771 \quad (60)$$

$$\tau = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} = \frac{1,034}{1,034 + 2,061} = 0,334 \quad (61)$$

$$\alpha K_r = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 3,8 \cdot e^{-8,4 \cdot 0,334 + 7,3 \cdot 0,334^2} = 0,516 \quad (62)$$

$$K_r = \frac{\alpha K_r}{\alpha} = \frac{0,516}{338,771} = 0,0015 \quad (63)$$

$$T_i/T_{pr} = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 0,28 \cdot e^{3,8 \cdot 0,334 + (-1,6) \cdot 0,334^2} = 0,837 \quad (64)$$

$$T_i = (T_i/T_{pr}) \cdot T_{pr} = 0,837 \cdot 2,061 = 1,725 \quad (65)$$

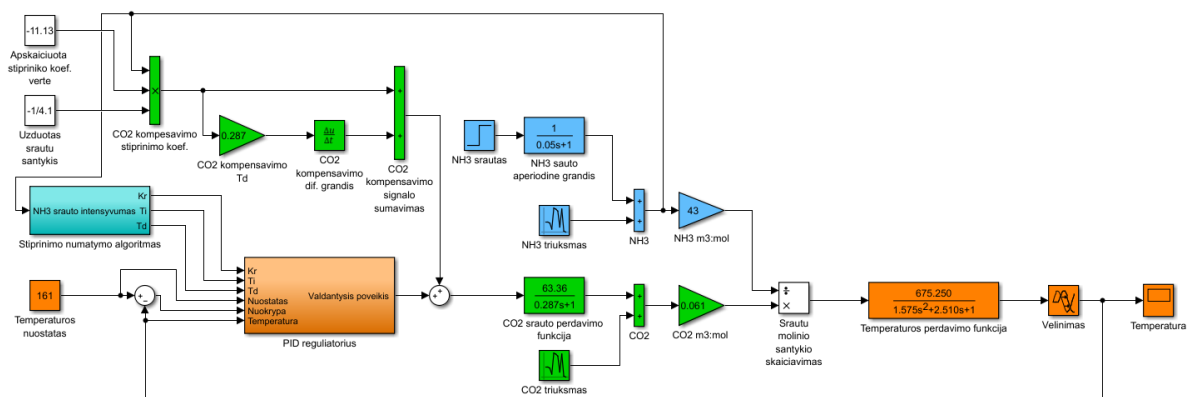
$$T_d/T_{pr} = a_0 e^{a_1 \tau + a_2 \tau^2} = 0,076 \cdot e^{3,4 \cdot 0,335 + (-1,1) \cdot 0,335^2} = 0,210 \quad (66)$$

$$T_d = (T_d/T_{pr}) \cdot T_{pr} = 0,210 \cdot 2,061 = 0,433 \quad (67)$$

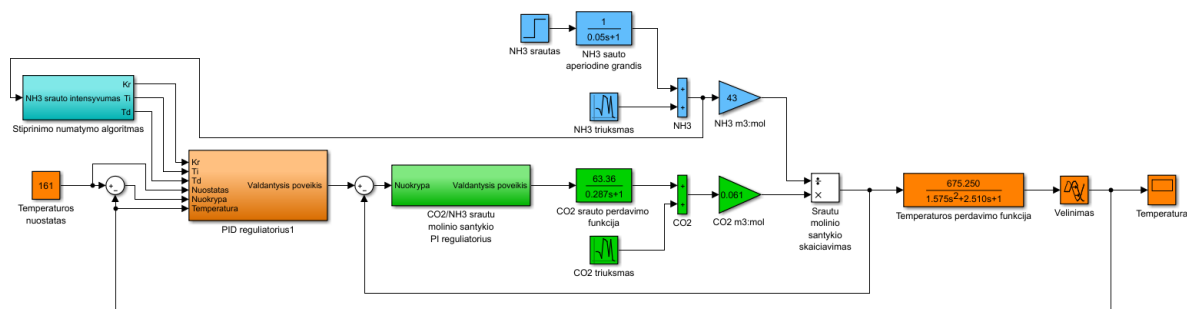
3.2.4 Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymas ir įvedimas ARS modeliams

Atlikus 3.1.1 skyriuje aprašytą karbamido sintezės kolonos eksperimentinį tyrimą, pastebėta, kad kintant jos darbo režimams, pasikeitė ir karbamido lydalo temperatūros pereinamojo proceso kreivės elgsena. Pagal 7–9 lentelių duomenis identifikavus (34–36) perdavimo funkcijų parametrų vertes išryškėjo jų dinamikos skirtumai. Vykdamt nevienodos apimties gamybos procesą, varijuoja temperatūros kitimo greitis, srautų santykio pokytis įneša skirtingo dydžio valdomo parametro pokyčius.

Atsižvelgus į 2.4.3 skyriuje pateiktas stiprinimo numatymo sudarymo prielaidas, kolonos apkrovimui įvertinti nuspręsta naudoti amoniako srauto intensyvumo vertę. Kadangi surinkti eksperimentiniai duomenys kolonai veikiant trimis skirtingais darbo režimais ($F_{NH_3} < 38$; $38 \leq F_{NH_3} < 47$; $F_{NH_3} \geq 47$), sudarytas identiškas kiekis regulatoriaus parametrų rinkinių, kurie 29, 30 pav. iliustruotų ARS modelių stiprinimo numatymo bloke „Stiprinimo numatymo algoritmas“ rotuojami pagal apkrovos įverčio dydį. Pilnas tiesioginio/grįžtamojo ryšio sistemos stiprinimo numatymo modelis pateiktas 3, o pakopinės – 4 prieduose.



29 pav. Adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS modelis, įvedus stiprinimo numatymo bloką



30 pav. Adaptyviosios pakopinės ARS modelis, įvedus stiprinimo numatymo bloką

Projektiniu darbo režimu ($F_{\text{NH}_3}=38 \text{ m}^3/\text{h}$) veikiančios sintezės kolonos 3.2.2 skyriuje aprašytos tiesioginio/grįžtamojo ryšio sistemos ir 3.2.3 pateiktas pakopinės PID reguliatorius, identifikavus valdomo objekto pirmosios eilės perdavimo funkcijas $W_{t11}(s)$ ir $W_{t13}(s)$, suderintas Kappa-Tau metodu (42–49, 60–67). Identiškas procedūras atlikus mažu ($F_{\text{NH}_3}=28 \text{ m}^3/\text{h}$) ir dideliu pajėgumu ($F_{\text{NH}_3}=47 \text{ m}^3/\text{h}$) veikiančioms sistemoms sudaryti 11 ir 12 lentelėse pateikti reguliatorių parametų rinkiniai.

11 lentelė. Adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos temperatūros kontūro PID reguliatoriaus parametų rinkiniai

Darbo režimas		Regulatoriaus parametrai		
Perdavimo funkcija	$F_{\text{NH}_3}, \text{m}^3/\text{h}$	P	T_i	T_d
$W_{t21}(s)$	< 38	0,636	2,190	0,549
$W_{t22}(s)$	≥ 38 < 47	0,421	1,974	0,495
$W_{t23}(s)$	≥ 47	0,463	1,556	0,390

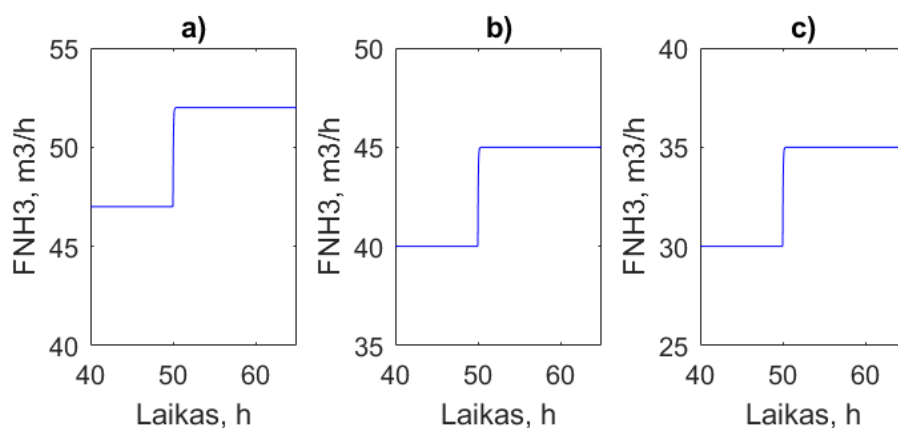
12 lentelė. Adaptyviosios pakopinės automatinio valdymo sistemos temperatūros kontūro PID reguliatoriaus parametų rinkiniai

Darbo režimas		Regulatoriaus parametrai		
Perdavimo funkcija	$F_{\text{NH}_3}, \text{m}^3/\text{h}$	P	T_i	T_d
$W_{t21}(s)$	< 38	0,0019	1,292	0,326
$W_{t22}(s)$	≥ 38 < 47	0,0015	1,718	0,431
$W_{t23}(s)$	≥ 47	0,0014	1,941	0,487

3.3 Modeliavimo rezultatų palyginimas ir analizė

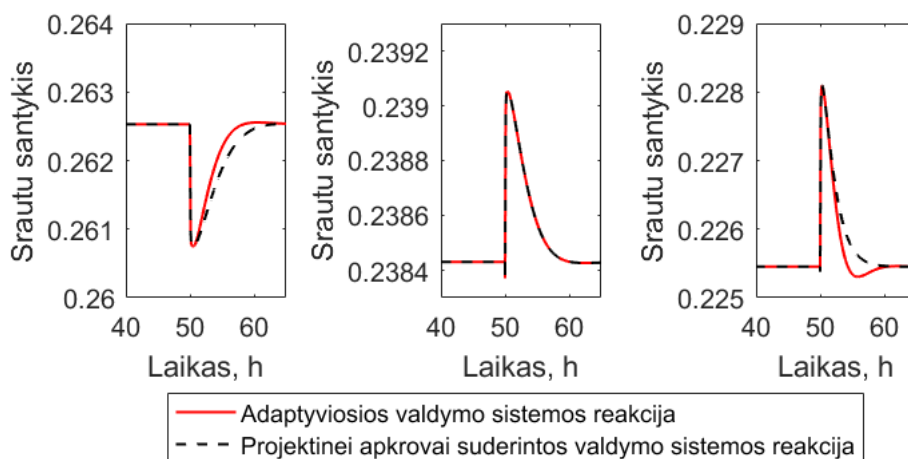
3.3.1 Tiesioginio ryšio valdymo sistemos paremtos grįžtamoju ryšiu modelių reakcijos į trikdantįjį poveikį analizė

Tiesioginio/grįžtamojo ryšio (24 pav.) ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos (29 pav.) veikimui iširti atliktas eksperimentinis tyrimas. Jų modeliuose amoniako tiekimo srauto intensyvumui F_{NH_3} , 13–14 lentelėse apibrėžtose kolonos apkrovos srityse ($F_{NH_3} < 38$; $38 \leq F_{NH_3} < 47$; $F_{NH_3} \geq 47$) įvesti 31 pav. pateikti šuoliniai trikdantieji poveikiai.

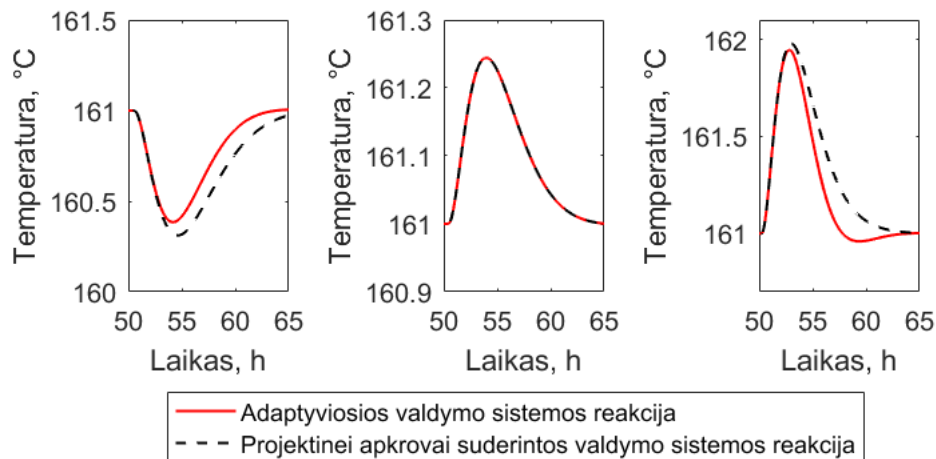


31 pav. Atliekant eksperimentus tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS modeliuose įvestų amoniako tiekimo srauto intensyvumą trikdančių poveikių kreivės

Atliekant eksperimentus, ARS modeliams pagal 10 lentelės duomenis parinktos jų F_{NH_3} pokyčio sritis atitinkančios karbamido lydalo temperatūros perdavimo funkcijų $W_t(s)$ parametrų vertės. Stebėti ir fiksuoti tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos modelio pradinių reaktantų (CO_2 ir NH_3) molinio santykio (32 pav.) ir karbamido lydalo temperatūros (33 pav.) pokyčiai.



32 pav. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS pradinių reaktantų tiekimo santykių valdymo, kompensuojant amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį, pereinamojo proceso kreivių palyginimas: a) intensyvios gamybos technologinio režimo atveju; b) projektinio technologinio režimo atveju; c) mažos apimties gamybos technologinio režimo atveju



32 pav. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS karbamido lydalo temperatūros valdymo, kompensuojant amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį, pereinamojo proceso kreivių palyginimas: a) intensyvios gamybos technologinio režimo atveju; b) projektinio technologinio režimo atveju; c) mažos apimties gamybos technologinio režimo atveju

Valdymo kokybės įvertinimui atlikti nustatyti (žr. 13 lentelę) ir 33 pav. pateikti karbamido lydalo temperatūros pereinamojo proceso kreivių reguliavimo laikai ir maksimali, suminė, vidutinė, dinaminė nuokrypos. Reguliavimo laiku yra laikomas laikas, per kurį pereinamojo proceso kreivė pasiekė reikšmę, kuri nuo pradinės reikšmės nutolusi 2 %.

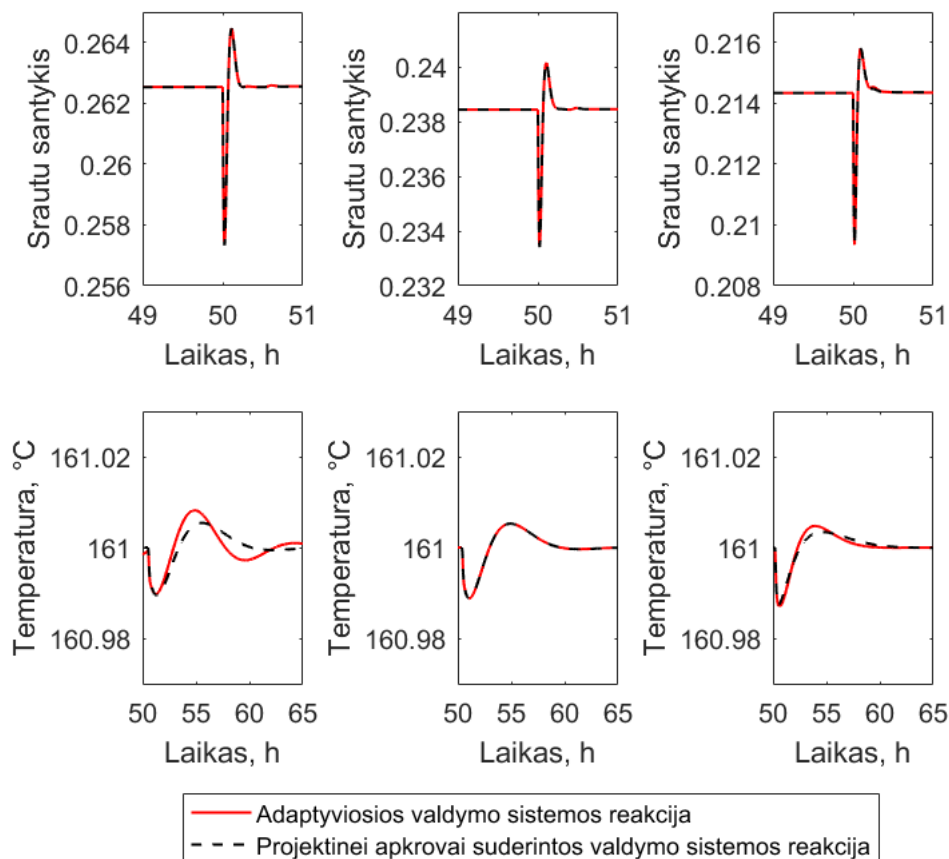
13 lentelė. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio ARS sistemų reguliavimo laiko ir dinaminių nuokrypų vertės, karbamido sintezės veikiant technologinio režimo, mažos apimties ($F_{NH_3} < 38$), gamybos technologinio režimo atvejais intensyvios gamybos ($F_{NH_3} > 47$) technologinio režimo, projektinio ($38 < F_{NH_3} < 47$)

Apkrova, F_{NH_3}	ARS	Reguliavimo laikas, h	Dinaminė nuokrypa, °C
< 38	Projektuotoji	12,046	0,978
	Adaptvyioji	11,479	0,946
≥ 38 < 47	Projektuotoji	13,406	1,244
	Adaptvyioji	13,406	1,244
≥ 47	Projektuotoji	16,000	0,689
	Adaptvyioji	12,726	0,616

Modeliavimo eksperimentai 13 lentelė parodė, kad adaptivi tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistema dinaminę nuokrypą sumažina vidutiniškai 6,934 % (nuo 0,978 iki 0,946, kai $F_{NH_3} < 38$ ir nuo 0,689 iki 0,616, kai $F_{NH_3} \geq 47$) ir reguliavimo laiką 12,6 % (nuo 12,046 iki 11,479, kai $F_{NH_3} < 38$ ir nuo 16,000 iki 12,585, kai $F_{NH_3} \geq 47$)

3.3.2 Pakopinės valdymo sistemos modelių reakcijos į trikdantįjį poveikį analizė

Pakopinės (27 pav.) ir adaptyviosios pakopinės valdymo sistemos (30 pav.) veikimui ištirti jų modeliuose atlikti identiški eksperimentai (kaip ir 3.3.1 skyriuje aprašytu atveju, tiriant adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio sistemos veikimą). Atliekant 31 pav. iliustruotus eksperimentus pakopinių ARS modeliuose, stebėti ir fiksuoti modelio (34 pav.) pradinių reaktantų (CO_2 ir NH_3) molinio santykio ir karbamido lydalo temperatūros pokyčiai.



33 pav. Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios pakopinės ARS pradinių reaktantų tiekimo santykių ir karbamido lydalo temperatūros valdymo, kompensuojant amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį, pereinamojo proceso kreivių palyginimas: a) intensyvios gamybos technologinio režimo atveju; b) projektinio technologinio režimo atveju; c) mažos apimties gamybos technologinio režimo atveju

Valdymo kokybės įvertinimui atlikti, nustatyti ir 14 lentelėje pateikti 33 pav. pavaizduoti antros eilutės karbamido lydalo temperatūros pereinamojo proceso kreivių reguliavimo laikai ir maksimali, suminė, vidutinė dinaminės nuokrypos. Reguliavimo laiku yra laikomas laikas, per kurį pereinamojo proceso kreivė pasiekė reikšmę, kuri nuo pradinės reikšmės nutolusi 2 %.

14 lentelė Projektinei apkrovai suderintos ir adaptyviosios pakopinės ARS sistemų, reguliavimo laiko ir dinaminių nuokrypų vertės, karbamido sintezės veikiant intensyvios gamybos ($F_{\text{NH}_3} > 47$) technologinio režimo, projektinio ($38 < F_{\text{NH}_3} < 47$), technologinio režimo, mažos apimties ($F_{\text{NH}_3} < 38$) gamybos technologinio režimo atvejais

Apkrova, F_{NH_3}	ARS	Reguliavimo laikas, h	Dinaminė nuokrypa, °C
< 38	Projektuoti	10,845	0,034
	Adaptyvioji	8,708	0,047
≥ 38 < 47	Projektuoti	12,960	0,011
	Adaptyvioji	12,960	0,011
≥ 47	Projektuoti	14,840	0,010
	Adaptyvioji	10,371	0,011

Modeliavimo eksperimentai 14 lentelė parodė, adaptyvioji pakopinė sistema dinaminę nuokrypą padidina vidutiniškai 24,1 % (nuo 0,034 iki 0,047, kai $F_{\text{NH}_3} < 38$ ir nuo 0,010 iki 0,011, kai $F_{\text{NH}_3} \geq 47$) ir reguliavimo laiką sumažina 24,9 % (nuo 10,845 iki 8,708, kai $F_{\text{NH}_3} < 38$ ir nuo 14,840 iki 10,371, kai $F_{\text{NH}_3} \geq 47$).

Išvados

1. Atlikta šiuo metu rankiniu būdu valdomo karbamido sintezės technologinio proceso analizė ir suformuluotas darbo tikslas sukurti karbamido sintezės kolonoje susidarančio lydalo temperatūros ir tiekiamų į koloną reaktantų srautų santykio automatinio valdymo sistemą. Įvertinti valdomo technologinio proceso ypatumai ir darbo tyrimams pasirinktos alternatyvios valdymo sistemos struktūros: tiesioginio/grįžtamojo ryšio ir pakopinė.
2. Surinkti informatyvūs technologinių parametru stebėjimo duomenys, kuriais remiantis identifikuoti valdomo proceso perdavimo funkcijų modeliai. Sudaryti modeliai panaudoti valdymo sistemų reguliatorių derinimui ir sistemų veikimo imitaciniam modeliavimui. Modelių identifikavimo skaičiavimai ir valdymo sistemų modeliai realizuoti Matlab/Simulink aplinkoje.
3. Atliktas tiesioginio/grįžtamojo ryšio ir pakopinės valdymo sistemų reguliatorių derinimas, naudojant Kappa-Tau ir Cohen-Coon derinimo taisykles, ir atliktas suderintų sistemų veikimo tyrimas kompensuojant identišką amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį. Modeliavimo eksperimentai parodė, kad pakopinės valdymo sistemos veikimo kokybės rodikliai (dinaminė nuokrypa $0,011\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir reguliavimo laikas $12,960\text{ h}$) yra geresni už tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos rodiklius (dinaminė nuokrypa $1,244\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir reguliavimo laikas $13,406\text{ h}$).
4. Atliktas adaptyviųjų sistemų veikimo modeliavimas kompensuojant identišką amoniako tūrinio srauto trikdantį poveikį neprojektinės apkrovos sąlygomis. Modeliavimo eksperimentai parodė, kad adaptyvi tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistema dinaminę nuokrypą sumažina vidutiniškai $6,934\%$ ir reguliavimo laiką $12,6\%$. Adaptyvi pakopinė sistema dinaminei nuokrypai teigiamos įtakos neturi, tačiau reguliavimo laiką sumažina $24,9\%$. Adaptyviose sistemose pastebimai sutrumpėja reguliavimo laikas, tačiau dinaminės nuokrypos pokytis absoliutiniais vienetais yra nereikšmingas.
5. Remiantis karbamido sintezės technologinio proceso alternatyvių automatinio valdymo sistemų tyrimo rezultatais, proceso valdymui rekomenduojama naudoti pakopinę valdymo sistemos schemą. Nors reguliatoriaus parametru adaptacija leidžia pagerinti pakopinės sistemos veikimo kokybės rodiklius, tačiau absoliutinių matavimo vienetų skalėje pagerėjimas nėra reikšmingas. Rekomenduojama naudoti pakopinę valdymo sistemą su pastoviai suderintais reguliatoriais.

Literatūros sąrašas

1. Irozoqui H. A., Isla M. A., Genoud C. M., „Simulation of a Urea Synthesis Reactor“, 1993. Prieiga per internetą:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Simulation-of-a-urea-synthesis-reactor.-2.-Reactor-Irazoqui-Isla/2f0e6d4ca56d01616b871f8525c1bc24440642c>

2. Hamidipour M., Mostoufi N. ir Sotudeh-Glaredagh R. „Modeling the synthesis section of and industrial ureaplant“, 2004. Prieiga per internetą:

https://www.academia.edu/952477/Modeling_the_synthesis_section_of_an_industrial_urea_plant

3. Manozca M. A. M., Espinosa J.J., Vandewalle J. „Control of the Synthesis Section of a Urea Plant by means of an MPC Controller“, 2006. Prieiga per internetą:

https://www.academia.edu/12013185/Control_of_the_Synthesis_Section_of_a_Urea_Plant_by_means_of_an_MPC_Controller

4. Saafan M. M. „A Sliding Mode Controller for Urea Plant“, 2016. Prieiga per internetą:

https://www.researchgate.net/publication/308117057_A_Sliding_Mode_Controller_for_Urea_Plant

5. AB „Achema“ Karbamido gamybos nuolatinis technologinis reglamentas TR-120-07, „Technologinio proceso aprašymas“, 2018.

6. AB „Achema“ Karbamido gamybos nuolatinis technologinis reglamentas TR-120-07, „Technologinių parametrų normos“, 2018.

7. AB „Achema“ Karbamido gamybos nuolatinis technologinis reglamentas TR-120-07, „Medžiagų balansas“, 2018.

8. AB „Achema“ Karbamido gamybos nuolatinis technologinis reglamentas TR-120-07, „Technologinio proceso kontrolė ir valdymas“, 2018.

9. Simutis R. „Sistemų modeliavimas ir identifikavimas“. Mokomoji knyga, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, Vilnius, 2008.

10. Luyben W. L. „Process modeling, simulation and control for chemical engineers“, McGraw-Hill Publishing Company, 1996.

11. Ikonen E. Najim K. „Advanced process identification and control“, New York, 2002.

12. Astrom K. J., Hagglund T. „Advanced PID control“, United States, 2006.

13. Levišauskas D. „Automatinio reguliavimo sistemų derinimas“. Mokomoji knyga, Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, Vilnius, 2008.

14. Altmann W. Macdonald D. „Process Control for Engineers and technicians“, Elsevier Ltd, 2005.

15. Shahrokhi M. and Zomorodi A. „Comparison of PID Controller Tuning Methods“, Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, 2012.

16. Astrom K. J., Murray R.M. „Feedback Systems“, Princeton University Press, New Jersey, Oxfordshire, 2008.
17. Levine W. S. „The Control Handbook“ , CRC Press, IEEE Press, United States of America, 1996.
18. Seborg D. E., F. E Thomas, A. M. Duncan, Doyle F. J. „Process Dynamics and Control“, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 2011.

Priedai

1 priedas. *Matlab* aplinkoje parašytas kodas, skirtas pirmosios eilės perdavimo funkcijų parametrus nustatyti, naudojant „Chemotaxis“ paieškos algoritmą ir eksperimentinius duomenis

```
%% Eksperimentiniai duomenys
t = [0 0.1250.2500.3750.5000.6250.7500.8751.000...
1.125 1.250 1.375 1.500 1.625 1.750 1.875];
flow1 = [6301.020 6531.428 6661.726 6848.770 6854.264... 6968.292
6976.108 6951.087 6956.711 6993.224 6983.081...
6985.220 6993.2497017.553]
flow = flow1 - 6301.020;

% Pradines optimizuojamu parametru reikšmes
Kobjp = 1;
Tobjp = 0.1;
tauobjp = 0;

% Uzduotas iteracijuskaicius
isk = 500000;

% Pradine kvadratu nuokrypos suma
for m = 1:length(t)
ymin(m) = Kobjp * (1-exp(-(t(m)-tauobjp)/Tobjp));
end
Smax = sum((temp-ymin).^2);

% Generuojamos naujos optimizuojamu parametru reikšmes
for l=1:isk
Kobj(l) = Kobjp + 0.1 * randn;
Tobj(l) = Tobjp + 0.01 * randn;
tauobj(l) = tauobjp + 0.01 * randn;

for n = 1:length(t)
y(l,n) = Kobj(l) * (1-exp(-(t(n)-tauobj(l))/Tobj(l)));
end
S(l) = sum((temp-y(l,:)).^2);

% Jei optimizuojamu parametru reikšmiu pokytis tampa nereikšmingu,
% paieska stabdoma
if l > 1 && S(l) == Smax
break
end

% Lyginama pradine ir iteracijos kvadratu nuokrypos suma
if S(l) < Smax
Kobjp = Kobj(l);
Tobjp = Tobj(l);
Smax = S(l);
```

```
end
end
```

2 priedas. Matlab aplinkoje parašytas kodas, skirtas antrosios eilės perdavimo funkcijų parametrą nustatyti, naudojant „Chemotaxis“ paieškos algoritmą ir eksperimentinius duomenis

```
%% Eksperimentiniai duomenys
t = [0 0.5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12];
temp1 = [138.043 138.043 139.165 141.688 147.309 151.766...
         153.030 154.244 153.221 154.606 154.941 153.855 154.476]
temp = temp1 - 138.043;

% Pradines optimizuojamu parametru reikšmes
Kobjp = 1;
Tobjp = 0.1;
taobjp = 0;

% Uzduotas iteracijų skaičius
isk = 500000;

% Pradine kvadratu nuokrypos suma
for m = 1:length(t)
    ymin(m) = Kobjp * (1 - (1 + (t(m) - taobjp) / Tobjp) * exp(-(t(m) -
    taobjp) / Tobjp));
end
Smax = sum((temp - ymin).^2);

% Generuojamos naujos optimizuojamu parametru reikšmes
for l = 1:isk
    Kobj(l) = Kobjp + 0.1 * randn;
    Tobj(l) = Tobjp + 0.01 * randn;
    taobj(l) = taobjp + 0.01 * randn;

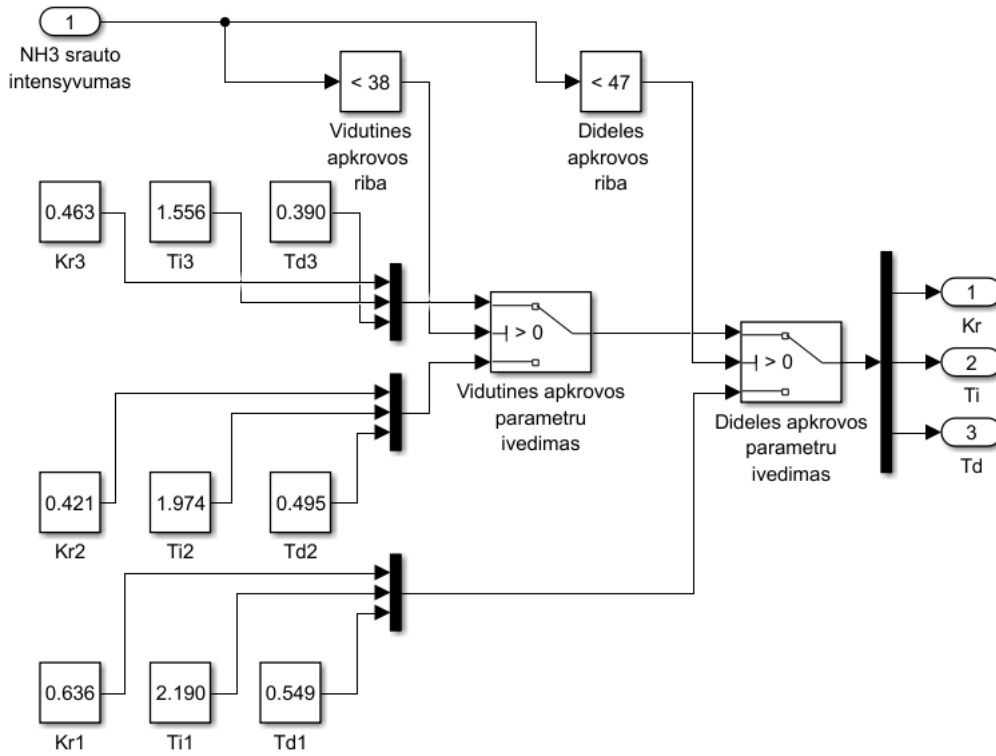
    for n = 1:length(t)
        y(l,n) = Kobj(l) * (1 - (1 + (t(n) - taobj(l)) / Tobj(l)) * ...
        exp(-(t(n) - taobj(l)) / Tobj(l)));
    end
    S(l) = sum((temp - y(l,:)).^2);

    % Jei optimizuojamu parametru reikšmiu pokytis tampa nereikšmingu,
    % paieska stabdoma
    if l > 1 && S(l) == Smax
        break
    end

    % Lyginama pradine ir iteracijos kvadratu nuokrypos suma
    if S(l) < Smax
        Kobjp = Kobj(l);
        Tobjp = Tobj(l);
        Smax = S(l);
    end
end
```


end
end

3 priedas. Simulink aplinkoje sudaryta adaptyviosios tiesioginio/grįžtamojo ryšio automatinio valdymo sistemos modelio stiprinimo numatymo algoritmo schema



4 priedas. Simulink aplinkoje sudaryta adaptyvosios pakopinės automatinio valdymo sistemos modelio stiprinimo numatymo algoritmo schema

