



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**AB „Achema“ azoto rūgšties neutralizatoriaus automatinio valdymo
sistemos sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Vaidas Minkštimas

Projekto autorius

Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**AB „Achema“ azoto rūgšties neutralizatoriaus automatinio valdymo
sistemos sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Vaidas Minkštimas

Projekto autorius

Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Doc. Dr. Jolanta Repšytė

Recenzentė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vaidas Minkštimas

AB „Achema“ azoto rūgšties neutralizatoriaus automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vaido Minkštimo, baigiamasis projektas tema „AB „Achema“ azoto rūgšties neutralizatoriaus 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)

Autorius Minkštimas, Vaidas. AB „Achema“ azoto rūgšties neutralizatoriaus automatinio valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: azoto rūgštis, amoniakas, valdymo sistema, regulatoriaus derinimas, šuolinė reakcija, procesų identifikavimas, perdavimo funkcija.

Kaunas, 2019. 45 p.

Santrauka

Šiame darbe aprašomas azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas AB „ACHEMA“ veikiančiame kalcio amonio nitrato gamybos agregate.

Pateikta darbe naudojamų valdymo sistemų struktūrų ir reguliatorių derinimo taisyklių literatūros apžvalga. Aprašomas kalcio amonio nitrato gamybos technologinis procesas, amonio nitrato gamybos procesas ir azoto rūgšties neutralizavimo dujiniu amoniaku stadija.

Aprašomi šuolinės reakcijos eksperimentai atlikti amonio nitrato gamybos skyriuje. Naudojant eksperimentinius duomenys identifikuoti perdavimo funkcijų modeliai. Sukurta azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistema, naudojant skirtingas reguliatorių derinimo taisykles nustatomi valdymo sistemos reguliatorių parametrai.

Naudojant Matlab/Simulink paketa atliekamas nežinomų perdavimo funkcijų parametrų nustatymas bei imituojamas sukurto valdymo sistemos modelio veikimas. Pateikti modeliavimo rezultatai, skaičiavimai, reakcijų kreivių palyginimai ir išvados.

Author's Minkštimas, Vaidas. Development and Investigation of Nitrogen Acid Neutralization device in SC "Achema". Master's Final Degree Project / supervisor Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas. Faculty of Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: nitric acid, ammonia, control system, controller tuning, step response, process identification, transfer function.

Kaunas, 2019. 45 pages.

Summary

This work describes Development and Investigation of Nitrogen Acid Neutralization device in SC "Achema", calcium ammonium nitrate production plant.

Information about control system structures and controller tuning methods which are used in this paper described in literature review. Literature review also contains description about technological process of the calcium ammonium nitrate, the production of ammonium nitrate and the stage of nitric acid neutralization.

Described step response experiments carried out in the ammonium nitrate production unit. Data from step response experiments were using for transfer functions models identification. Created nitric acid neutralizer control system, to set the controller parameters were using different controller tuning rules.

Matlab/Simulink software were using to find unknown transfer function parameters and to simulate created control system model. In this paper also reviewed simulation results, calculations, reaction curve comparisons and conclusions.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga ir analizė.....	11
1.1. Kaskadinio valdymo sistemos	11
1.2. Santykio reguliavimo sistemos.....	12
1.3. Reguliatorių derinimo metodai.....	13
1.3.1. Ziegler-Nichols.....	13
1.3.2. Cohen-Coon.....	14
1.3.3. Vidinio modelio valdymo (IMC) derinimas.....	15
1.3.4. Optimizavimo kriterijais paremtos IAE, ISE ir ITAE.....	16
2. Kalcio amonio nitrato gamybos technologinis procesas	18
2.1. Bendra kalcio amonio nitrato gamybos agregato charakteristika ir technologinio proceso stadijos.....	18
2.2. Amonio nitrato tirpalo gamybos technologinio proceso aprašymas	21
2.3. Azoto rūgšties neutralizatoriuje vykstančio technologinio proceso aprašymas	23
2.4. Amonio nitrato technologinio gamybos proceso stebėsenos sistemos.....	25
3. Azoto rūgšties neutralizavimo proceso kaip valdymo objekto tyrimas.....	26
3.1. Šuolinės reakcijos eksperimentas perdavimo funkcijų nustatymui.....	26
3.2. Proceso perdavimo funkcijų identifikavimas eksperimentiniais duomenimis	29
4. Valdymo sistemos modelis	32
4.1. Valdymo sistemos struktūra	32
4.2. Azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos kontūrų modeliavimas ir derinimas	33
4.2.1. Vidinis kontūras.....	33
4.2.2. Išorinis kontūras	34
5. Valdymo sistemos modeliavimo rezultatų palyginimas ir analizė	40
5.1. Valdymo sistemos modeliavimas keičiant dujinio amoniako srautą.....	40
5.2. Valdymo sistemos modeliavimas įvedant trikdį.....	42
Išvados	44
Literatūros sąrašas	45
Priedai.....	46
1 priedas. MATLAB aplinkoje parašytas tekstas skirtas perdavimo funkcijų parametrų nustatymui naudojant chemotaksinės paieškos algoritimą ir eksperimentinius duomenys.....	46
2 priedas. Matlab/Simulink aplinkoje realizuotas valdymo sistemos modelis.....	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Reguliatorių parametų nustatymas Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu	13
2 lentelė. Reguliatorių parametų nustatymas <i>Ziegler-Nichols</i> dažninės reakcijos metodu	14
3 lentelė. Reguliatorių parametų nustatymas naudojant <i>Ziegler-Nichols</i> pirmos eilės su vėlavimu modelio derinimo formules	14
4 lentelė. Reguliatorių parametų nustatymas Cohen-Coon metodu	15
5 lentelė. IMC derinimo taisyklės pirmos eilės modeliams su vėlavimu.....	16
6 lentelė. IAE (absoliutinės paklaidos integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės	17
7 lentelė. ISE (kvadratinės paklaidos integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės	17
8 lentelė. ITAE (absoliutinės paklaidos su laiko svoriniu koeficientu integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės	17
9 lentelė. Azoto rūgšties srauto pokytis pakeitus azoto rūgšties vožtuvo padėtį	26
10 lentelė. Amonio nitrato pH kitimas eksperimento metu	27
11 lentelė. Dujinio amoniako srauto kitimas eksperimento metu	28
12 lentelė. Dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykio kitimas eksperimento metu	29
13 lentelė. PID reguliatorių parametų nustatymo skaičiavimai.....	35

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kaskadinio reguliavimo sistemos struktūra	11
2 pav. Santykio reguliavimo sistemos struktūra, kurioje naudojamas santykio regulatorius lyginantis išėjimą (r) su nuostata (r_{nuost}).	12
3 pav. Santykio reguliavimo sistemos struktūra, kai nustatoma manipuluojamo kintamojo y vertė	12
4 pav. Vidinio modelio valdymo sistemos blokinė schema	16
5 pav. Kalcio amonio nitrato gamybos proceso vizualizacija.....	19
6 pav. Kalcio amonio nitrato gamybos proceso blokinė schema [4]	20
7 pav. Azoto rūgšties neutralizatorius, amonio nitrato gamybos skyriuje.....	22
8 pav. Amonio nitrato gamybos schema.	23
9 pav. Azoto rūgšties neutralizatoriaus schema su technologinių parametrų matavimo taškais	24
10 pav. Amonio nitrato pH matavimo sistema	25
11 pav. Azoto rūgšties srautą reguliuojantis vožtuvas.....	27
12 pav. Dujinio amoniako srautą reguliuojantis vožtuvas.	28
13 pav. Srauto pokytis aprašytas perdavimo funkcija W_1 , modelio reakcijos kreivių palyginimas su eksperimentiniais duomenimis	31
14 pav. Amonio nitrato pH kitimas aprašytas perdavimo funkcija W_2 , modelio reakcijos kreivių palyginimas su eksperimentiniais duomenimis	31
15 pav. Azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos struktūra	32
16 pav. Azoto rūgšties srauto reakcija (b), kai šuoliškai pakečiamas dujinio amoniako srautas (a)	33
17 pav. Eksperimentinių (raudona linija) ir modeliavimo (žalia linija) duomenų palyginimas	34
18 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatorių derinimui naudojant Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, ITAE, IAE ir ISE derinimo metodus.	36
19 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus.	36
20 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus su koreguotais stiprinimo koeficientais, šuoliškai sumažėjus dujinio amoniako srautui.	37
21 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus su koreguotais stiprinimo koeficientais, šuoliškai padidėjus dujinio amoniako srautui.....	38
22 pav. ARS reakcija pasikeitus nustatytam srautų santykiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h.....	38
23 pav. ARS reakcija pasikeitus nustatytam srautų santykiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h.....	39
24 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas mažinant dujinio amoniako srautą: a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija	40
25 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas didinant dujinio amoniako srautą: a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija	41
26 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas, kai procesą veikiant santykio trikdžiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h : a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija.....	42
27 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas, kai procesą veikiant santykio trikdžiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h : a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija.....	43

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

AN – amonio nitratas;

KAN – kalcio amonio nitratas;

pH – vandenilio potencialas;

ARS – automatinio reguliavimo sistema;

PID – reguliatorius, turintis grįžtamąjį ryšį ir naudojamas pramoninėse valdymo sistemose;

ITAE – absoliutinės paklaidos su laiko svoriniu koeficientu integralas;

IAE – absoliutinės paklaidos integralas;

ISE – kvadratinės paklaidos integralas;

IMC – vidinio modelio valdymas.

Įvadas

Darbe tirama kalcio amonio salietros gamybos agregato, veikiančio akcinėje bendrovėje „Achema“, dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykio valdymo sistema. Azoto rūgšties neutralizatoriuje dujiniu amoniaku neutralizuojama azoto rūgštis, šio proceso metu pagaminamas amonio nitrato (AN) tirpalas, kurio koncentracija turi atitikti keliamus reikalavimus. Nuo AN tirpalo koncentracijos išlaikymo priklauso gaminamo produkto kokybė, susidaro mažesni kiekiai šalutinių produktų, užtikrinamas stabilus agregato darbo režimas, todėl labai svarbu, kad AN tirpalo paruošimo proceso valdymo sistema pasižymėtų gera valdymo kokybe ir tiksliai palaikytų nustatytų technologinių parametru vertes. Nepavykus išlaikyti pastovaus dujinio amoniako ir azoto rūgšties santykio, neužtikrinama tinkama AN tirpalo koncentracija, susidaro dideli kiekiai bazinio garo (bazinis garas – tai garas užterštas amonio nitratu ir amoniaku). Neužtikrinus amonio nitrato reikiamos koncentracijos, gaminama nekokybiška kalcio amonio salietra (KAN).

Tiriamąo projekto tikslai ir uždaviniai

- Išnagrinėti literatūros šaltinius kuriose apžvelgiamos cheminės technologijos procesų valdyme naudojamas valdymo sistemų struktūros ir reguliatorių derinimo metodai.
- Išanalizuoti kalcio amonio nitrato gamybos technologinį procesą.
- Išanalizuoti kalcio amonio salietros agregato dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykio proceso reguliavimo ypatumus.
- Ištirti azoto rūgšties neutralizavimo dujinių amoniaku procesą kaip valdymo objektą, sudaryti jo matematinį modelį.
- Sukurti valdymo sistemą.
- Modeliuojant ištirti valdymo sistemos veikimą.
- Išanalizavus tyrimų rezultatus pateikti išvadas.

Matematiniam proceso modeliui parenkamos perdavimo funkcijos. Valdymo objektas tiriamas atlikus šuolinės reakcijos eksperimentus. Dinaminiams proceso perdavimo funkcijų parametrms nustatyti naudojami skaitmeniniai metodai. Valdymo sistemos modelis kuriamas ir išbandomas naudojant Matlab/Simulink programinį paketą.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

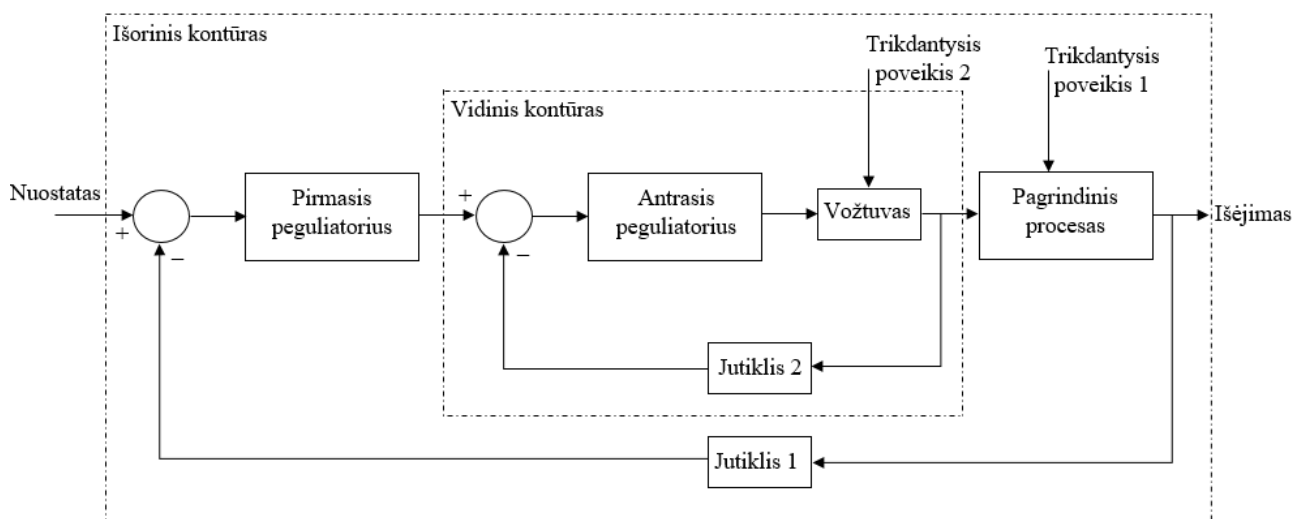
Šiame poskyryje apžvelgiamos tiriamajame darbe naudojamos valdymo sistemų struktūros bei reguliatorių derinimo metodai.

1.1. Kaskadinio valdymo sistemos

Paprasčiausia automatinio proceso valdymo struktūra yra grįžtamojo ryšio valdymo sistema, kompensuojanti proceso trikdžius. Pagrindinė tokios sistemos spraga yra tai, kad reakcija į trikdantįjį poveikį sukelia sistemos išėjimo pokytį jau esant suformuotam valdančiajam poveikiui. Vadinasi, trikdančiam poveikiui veikiant procesą, kontroliuojamas kintamasis nukrypsta nuo užduotos vertės, tuomet grįžtamojo ryšio pagalba atliekami korekciniai veiksmai. Norint inicijuoti korekcinis veiksmus, reikalingas nukrypimas nuo kontroliuojamojo kintamojo. Net ir esant šiam trūkumui, didžioji dalis pramonėje taikomų valdymo sistemų yra būtent grįžtamojo ryšio valdymo sistemos. Tokio tipo valdymo sistemos užtikrina ganėtinai saugų, kokybišką ir gerų našumų pasižyminti gamybos procesą [8].

Griežtėjant reikalavimams procesui, procesuose su lėta dinamika arba procesuose, kuriuose dažnai pasitaiko trikdžių, grįžtamojo ryšio reguliavimas gali būti nepriimtinas. Taigi, norint užtikrinti reikiamą našumą, atsiranda poreikis naudoti kitokio tipo valdymo sistemas. Viena tokių valdymo sistemų yra kaskadinio valdymo sistema, kurios taikymas gerokai pagerina grįžtamojo ryšio reguliavimą [8].

Kaskadinis valdymas yra vienas iš labiausiai paplitusių ir sėkmingiausių valdymo sistemų struktūrų, plačiai naudojama daugelyje cheminių procesų. Kaskadinio valdymo struktūroje vienas grįžtamojo ryšio kontūras yra įdėtas į kitą grįžtamojo ryšio kontūrą naudojant du grįžtamojo ryšio reguliatorius, kurioje pirmojo (angl. master) valdiklio išvestis yra antrojo (angl. slave) valdiklio nuostatas [5].



1 pav. Kaskadinio reguliavimo sistemos struktūra

Kaskadinį valdymą galima naudoti esant keliems matavimo signalams ir vienam valdomam kintamajam. Tai ypač naudinga kai yra reikšmingos dinamikos, pvz., esant ilgai laiko pastoviajai tarp valdomojo ir proceso kintamųjų. Kaskadinis reguliavimas naudingas atsitiktiniam trikdžiui veikiant valdomąjį objektą arba kai antrinė proceso dalis turi reikšmingą vėlavimą ir netiesiškumą,

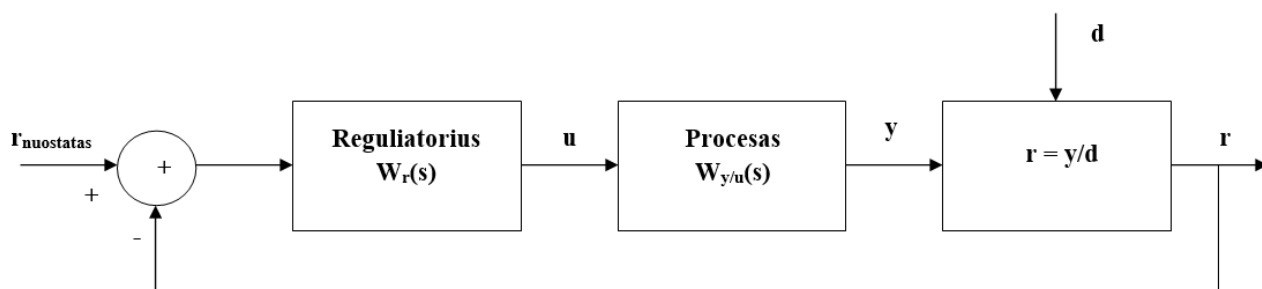
tai gali gerokai pagerinti reguliavimo efektyvumą [6] [7]. Kadangi reikalingi skaičiavimai yra nesudėtingi, kaskadinį valdymą galima įdiegti panaudojant įvairias analogines ir skaitmenines priemones. Šis ganėtinai paprastai įgyvendinimas ir potencialiai didelio valdymo efektyvumo derinys leido daugelį dešimtmečių plačiai taikyti kaskadinio valdymo metodą [9].

1.2. Santykio reguliavimo sistemos

Santykio reguliavimo sistemos tikslas išlaikyti dviejų ar daugiau proceso kintamųjų santykį. Matuojant nekontroliuojamą srautą ar jo pokytį, reguliuojamo srauto vertė yra keičiama taip, kad būtų išlaikomas pastovus abiejų srautų santykis. Šiuo atveju reguliavimo tikslas yra palaikyti nustatytą santykį ($r_{nuostatas}$) tarp nepriklausomojo (d) ir manipuluojamojo (y) įėjimo kintamųjų:

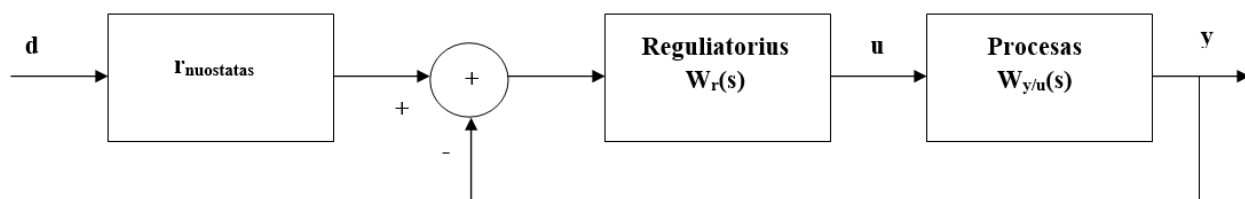
$$r = \frac{y}{d} = r_{nuostatas} \quad (1)$$

Santykis gali būti reguliuojamas realizavus vieną iš dviejų valdymo schemų [5]. Pirmojoje schemoje apskaičiuojama santykio momentinė vertė panaudojant santykio skaičiavimo bloką, kuriame apskaičiuojamos išmatuotos kintamųjų y ir d vertės. Momentinė santykio vertė grįžtamuju ryšiu perduodama į sumavimo elementą, kur palyginama su nustatyta santykio verte $r_{nuostatas}$. Apskaičiuotas paklaidos signalas santykio reguliatoriui išduoda valdantį poveikį, kuris koreguoja manipuluojamo kintamojo y vertę.



2 pav. Santykio reguliavimo sistemos struktūra, kurioje naudojamas santykio reguliatorius lyginantis išėjimą (r) su nuostata (r_{nuost}).

Antroje schemoje matuojamas nepriklausomas kintamasis d padauginamas iš nustatyto santykio $r_{nuostatas}$. Sandaugos rezultatas $d \cdot r_{nuostatas}$ yra manipuluojamojo kintamojo y reguliatoriaus nuostata y_{nuost} .



3 pav. Santykio reguliavimo sistemos struktūra, kai nustatoma manipuluojamo kintamojo y vertė

Praktikoje dažniau naudojama antrojo tipo valdymo schema, nes ji projektuojant ir derinant yra paprastesnė [1].

Santykio reguliavimo sistemos dažniausiai naudojamos įmaišant ingredientus nustatytais kiekiais į pagrindinį produktą arba kontroliuojant dvejų skirtingų medžiagų kiekius į cheminių reaktorių [10].

1.3. Reguliatorių derinimo metodai

Atliekant sudėtingų, dviejų ar daugiau kontūrų turinčių valdymo sistemų reguliatorių derinimus, įprasta valdymo sistemą išskaidyti į atskiras vieno kontūro sistemas ir atskirai atlikti kiekvieno valdymo sistemos kontūro reguliatoriaus derinimą. Šiame poskyryje apžvelgiami plačiausiai taikomi vieno kontūro automatinio reguliavimo sistemų derinimo metodai tolydiesiems P, PI ir PID reguliatoriams bei šių derinimo metodų savybės.

1.3.1. Ziegler-Nichols

1930 m., pirmą kartą rinkoje pasirodžius PI ir PID tipo reguliatoriams, nebuvo aiškiai nurodyta kaip atlikti jų derinimą. Reguliatorių derinimas buvo atliekamas „bandymų ir klaidų metodu“, o gauti rezultatai nebuvo patikimi. Tačiau viskas pasikeitė 1942m., J. G. Ziegler'ui ir N.B. Nichols'ui paskelbus straipsnį, kuriame buvo aprašyti du klasikiniai P, PI ir PID reguliatorių derinimo metodai [11]. Šie metodai dažnai naudojami kaip derinimo procedūrų pagrindas kuriant ir gaminant reguliatorius arba pritaikant reguliatorius pramoniniuose procesuose. Tai yra plačiai paplitę metodai tiek originaliame, tiek modifikuotuose variantuose. Metodai pagrįsti tam tikru valdomojo proceso dinaminėmis savybėmis nustatymu, o gautus parametrus įvedus į derinimo formules, apskaičiuojami reguliatorių parametrai. Derinimo taisyklės sudarytos taip, kad svyravimų amplitudės slopinimo santykis nebūtų didesnis kaip 0,25 [1] [7].

Pirmasis metodas arba laiko srities metodas yra paremtas proceso šuoline reakcija atviraime kontūre. Pirmiausia nustatomas maksimalus reakcijos taškas, brėžiant liestinę per šį tašką, o susikirtimo su koordinatinių ašimis vietose nustatomi parametrai α (stiprinimas) ir τ_{pr} (vėlinimas).

1 lentelė. Reguliatorių parametrų nustatymas Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
P	$1/\alpha$	--	--
PI	$0,9/\alpha$	$3\tau_{pr}$	--
PID	$1,2/\alpha$	$2\tau_{pr}$	$\tau_{pr}/2$

Antrasis metodas arba dažninės reakcijos metodas sukurtas remiantis proceso dažninės reakcijos parametrų K_u (stiprinimo koeficientas) ir T_u (maksimalus periodas) nustatymu.

Parametrai K_u ir T_u nustatomi PID reguliatoriaus parametrus nustatant – $T_i = \infty$, $T_d = 0$, tuomet didinamas reguliatoriaus stiprinimo koeficientas, kol procese atsiranda svyravimų. Tokiu atveju stiprinimas lygus K_u , o svyravimų periodas T_u [1] [7].

2 lentelė. Reguliatorių parametrų nustatymas *Ziegler-Nichols* dažninės reakcijos metodu

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
P	$0,5K_u$	--	--
PI	$0,4K_u$	$0,8T_u$	--
PID	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

Ziegler'io ir Nichols'o derinimo taisyklės pritaikytos pirmosios eilės su vėlavimu modeliams ir pateikiamos 3 lentelėje, kur reguliatorių parametrams nustatyti naudojami tris dinaminiai proceso parametrai. Šį derinimo metodą taikyti rekomenduojama vėlavimo trukmės ir laiko pastoviosios santykiui esant diapazone $0,1 < (\tau_{pr} / T_{pr}) < 0,5$ [1].

3 lentelė. Reguliatorių parametrų nustatymas naudojant *Ziegler-Nichols* pirmos eilės su vėlavimu modelio derinimo formules

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
P	$\frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}}$	--	--
PI	$\frac{0,9T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}}$	$3,33 \tau_{pr}$	--
PID	$\frac{1,2T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}}$	$2\tau_{pr}$	$\tau_{pr}/2$

Atliekant reguliatorių derinimą *Ziegler-Nichols* metodais, reguliatorių parametrai nustatomi apytiksliai, todėl norint pasiekti geresnę valdymo kokybę, kartais būtina koreguoti reguliatorių parametrus.

1.3.2. Cohen-Coon

Ziegler'io ir Nichols'o reguliatorių derinimo metodai ne visada užtikrina tinkamą reguliavimo kokybę. Todėl norint užtikrinti geresnę reguliavimo kokybę, koreguojami parametrai. Pagrindinis Ziegler ir Nichols metodo privalumas yra paprastumas, todėl tikslas kuriant naujus reguliatorių derinimo metodus, išlaikyti šio metodo paprastumą kartu pagerinant reguliavimo kokybę [1].

Cohen-Coon modifikavo *Ziegler-Nichols* derinimo taisyklės sudarytas pirmos eilės su vėlavimu modeliams. G.H. Cohen'as ir G. A. Coon'as pateikė tikslesnes derinimo taisyklės su 0.25 slopinimo laipsniu. Šį derinimo metodą taikyti rekomenduojama vėlavimo trukmės ir laiko pastoviosios santykiui esant diapazone $0,1 < (\tau_{pr} / T_{pr}) < 1$ [14]. Reguliatorių parametrų nustatymas pagal Cohen-Coon metodą pateiktas 4 lentelėje.

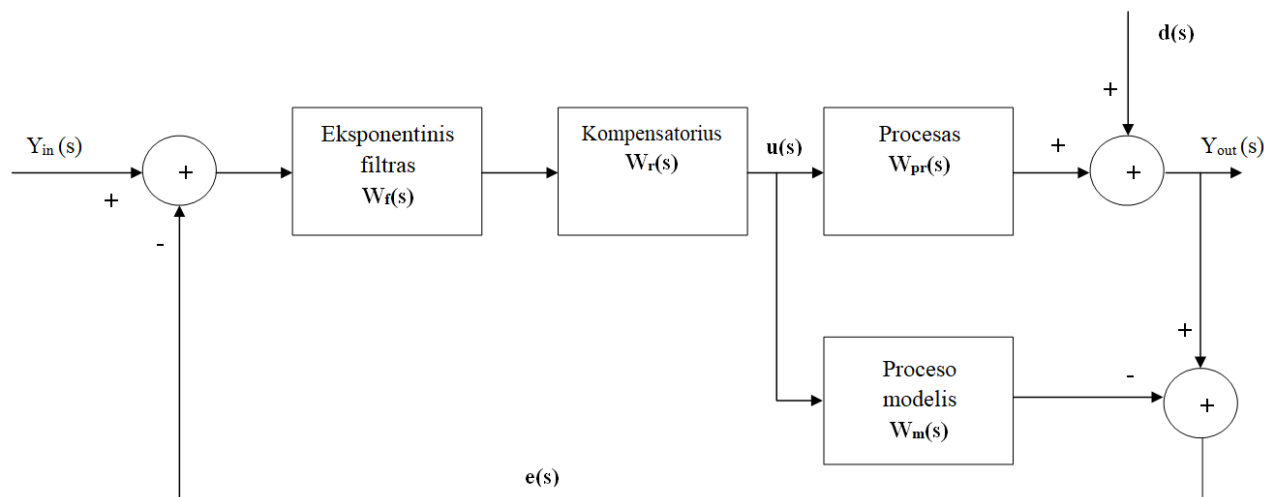
4 lentelė. Reguliatorių parametrų nustatymas Cohen-Coon metodu

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
P	$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(1 + \frac{\tau_{pr}}{3T_{pr}} \right)$	--	--
PI	$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(0,91 + \frac{\tau_{pr}}{12T_{pr}} \right)$	$T_i = \frac{30 + 3\tau_{pr}/T_{pr}}{9 + 20\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$	--
PD	$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(1,25 + \frac{\tau_{pr}}{6T_{pr}} \right)$	--	$T_d = \frac{6 - 2\tau_{pr}/T_{pr}}{22 + 3\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$
PID	$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(1,33 + \frac{\tau_{pr}}{4T_{pr}} \right)$	$T_i = \frac{32 + 6\tau_{pr}/T_{pr}}{13 + 8\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$	$T_d = \frac{4}{11 + 2\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$

1.3.3. Vidinio modelio valdymo (IMC) derinimas

Vidinio modelio valdymo derinimo taisyklės (IMC) tai stabili ir patikima reguliatorių derinimo technika, kurios tikslas yra vidinio modelio reguliatoriaus veikimą suderinti su PID reguliatoriaus veikimu. Dėl šių priežasčių IMC reguliatorių derinimo metodas yra toks populiarus ir plačiai naudojamas [12]. Valdymo sistemos suderintos naudojant IMC derinimo taisykles, gerai reaguoja į nuostato pokyčius ir prasčiau į trikdžius, taip pat šio tipo reguliatoriai ypač naudingi, kai proceso vėlinimo laikas yra bene dvigubai ilgesnis už proceso laiko pastoviąją [16]. Naudojant vidinio modelio valdymą gali būti sudaromas grįžtamojo ryšio reguliatorius [15]. Vidinio modelio valdymo blokinė schema pateikiama 3 pav.

Blokinėje schemoje $W_{pr}(s)$ yra proceso perdavimo funkcija, o grįžtamojo ryšio reguliatorius formuojamas iš trijų blokų – Proceso modelio $W(s)$, eksponentinio filtro $W_f(s)$ ir kompensatoriaus $W_r(s)$. Trikdantysis poveikis valdymo sistemai yra $d(s)$, proceso įėjimui ir proceso modelio įėjimui naudojamas vienodas įėjimo signalas $u(s)$. Atliekamas proceso išėjimo $Y_{out}(s)$ palyginimas su proceso modelio išėjimu ir apskaičiuojamas nuokrypos signalas $e(s)$. Jeigu trikdantysis poveikis $d(s)$ lygus nuliui, tuomet nuokrypio signalas $e(s)$ naudojamas skirtumo, atsirandančio tarp proceso $W_{pr}(s)$ ir proceso modelio $W(s)$ stebėjimui. Jeigu $W_{pr}(s)=W(s)$ tuomet nuokrypio signalas $e(s)$ lygus trikdžiui $d(s)$.



4 pav. Vidinio modelio valdymo sistemos blokinė schema

Pagal vidinio modelio valdymo taisyklės sudarytas reguliatorius turi tokią perdavimo funkciją:

$$W_r(s) = \frac{W_f(s)W_r(s)}{1 - W_f(s)W_r(s)W_m(s)} \quad (2)$$

Realaus proceso perdavimo funkcijai $W_{pr}(s)$ parenkamas šią funkciją atitinkantis vidinis modelis $W_m(s)$, kompensatorius $W_r(s)$ parenkamas atitinkamai pagal proceso modelį $W_m(s)$, sunkiai realizuojami ir svyravimus galintys sukelti elementai nėra naudojami. Labai svarbu, kad kompensatoriaus $W_r(s)$ stiprinimas atitiktų proceso modelį $W_{pr}(s)$. [13] Naudojamos įvairios reguliatorių parametrų nustatymo formulės skirtingiems procesų modeliams. Derinimo taisyklės naudojamos pirmos eilės modeliams su vėlavimu pateikiamos 5 lentelėje.

5 lentelė. IMC derinimo taisyklės pirmos eilės modeliams su vėlavimu

Regulatorius	K_r	T_i	T_d	T_f ($T_f > 0.2T_{pr}$)
PI	$\frac{T_{pr}}{K_{pr}T_f}$	T_{pr}	--	$\frac{T_f}{\tau_{pr}} > 1,7$
PI (patikslintas)	$\frac{2T_{pr} + \tau_{pr}}{2K_{pr}T_f}$	$T_{pr} + \frac{\tau_{pr}}{2}$	--	$\frac{T_f}{\tau_{pr}} > 1,7$
PID	$\frac{2T_{pr} + \tau_{pr}}{2K_{pr}(T_f + \tau_{pr})}$	$T_{pr} + \frac{\tau_{pr}}{2}$	$\frac{T_{pr}\tau_{pr}}{2T_{pr} + \tau_{pr}}$	$\frac{T_f}{\tau_{pr}} > 0,25$

1.3.4. Optimizavimo kriterijais paremtos IAE, ISE ir ITAE

Optimizavimo metodų panaudojimas projektuojant reguliatorius yra labai efektyvus, turint konkrečią PID reguliatorių struktūrą ir parametrus. Parinktam optimizavimo kriterijui sudaroma tikslo funkcija, kurioje optimizavimo kriterijai sujungiami su optimizuojamais reguliatorių parametrais ir įvedami apribojimai. Tokios struktūros optimizavimo uždavinys gali būti sprendžiamas skaitmeniniais optimizavimo metodais.

Turint tikslą minimizuoti paklaidą tarp proceso nuostato ir išėjimo, dažnais atvejais reguliatorių derinimo metodai sudaromi naudojant integralinius optimizavimo kriterijus, tokius kaip IAE (absoliutinės paklaidos integralas), ISE (kvadratinės paklaidos integralas) ar ITAE (absoliutinės paklaidos su laiko svoriniu koeficientu integralas). Turint preciziškai aproksimuotą proceso modelį, tikslinga reguliatoriaus derinimui pasirinkti integraliniais kriterijais paremtas derinimo taisykles. Tačiau reakcijai į nuostato pokytį ir trikdančiojo poveikio kompensavimui, reguliatoriaus derinimo parametrai apskaičiuojami pagal skirtingas formules. Reguliatorių derinimo formulės trikdančiojo poveikio kompensavimui pateikiamos 6, 7, 8 lentelėse.

6 lentelė. IAE (absoliutinės paklaidos integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
PI	$\frac{0,984}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,986}$	$\frac{T_{pr}}{0,608} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,707}$	--
PID	$\frac{1,435}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,921}$	$\frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738}$	$0,381 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995}$

7 lentelė. ISE (kvadratinės paklaidos integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
PI	$\frac{1,305}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,959}$	$\frac{T_{pr}}{0,492} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,739}$	--
PID	$\frac{1,495}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,945}$	$\frac{T_{pr}}{1,101} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,771}$	$0,560 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{1,006}$

8 lentelė. ITAE (absoliutinės paklaidos su laiko svoriniu koeficientu integralas) kriterijaus reguliatorių derinimo formulės

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
PI	$\frac{0,859}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,977}$	$\frac{T_{pr}}{0,674} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,680}$	--
PID	$\frac{1,357}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947}$	$\frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738}$	$0,381 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995}$

2. Kalcio amonio nitrato gamybos technologinis procesas

Darbe tiriama amonio nitrato gamybos sistema, neutralizuojant azoto rūgštį su dujiniu amoniaku, azoto rūgšties neutralizatoriuje. Tai yra viena iš kalcio amonio nitrato gamybos technologinio proceso stadijų AB „Achema“ eksploatuojamame kalcio amonio nitrato gamybos agregate. Šiame poskyryje išnagrinėjamas kalcio amonio nitrato gamybos technologinis procesas ir jo stadijos, aprašomi amonio nitrato tirpalo gamybos bei azoto rūgšties neutralizavimo technologiniai procesai.

2.1. Bendra kalcio amonio nitrato gamybos agregato charakteristika ir technologinio proceso stadijos

AB „Achema“ KAN gamyba pradėta 2003 m. Projektinis cecho pajėgumas 540000 t. per metus, iki 1800 t. kalcio amonio nitrato, per parą, gaminant produktą, kurio kokybė:

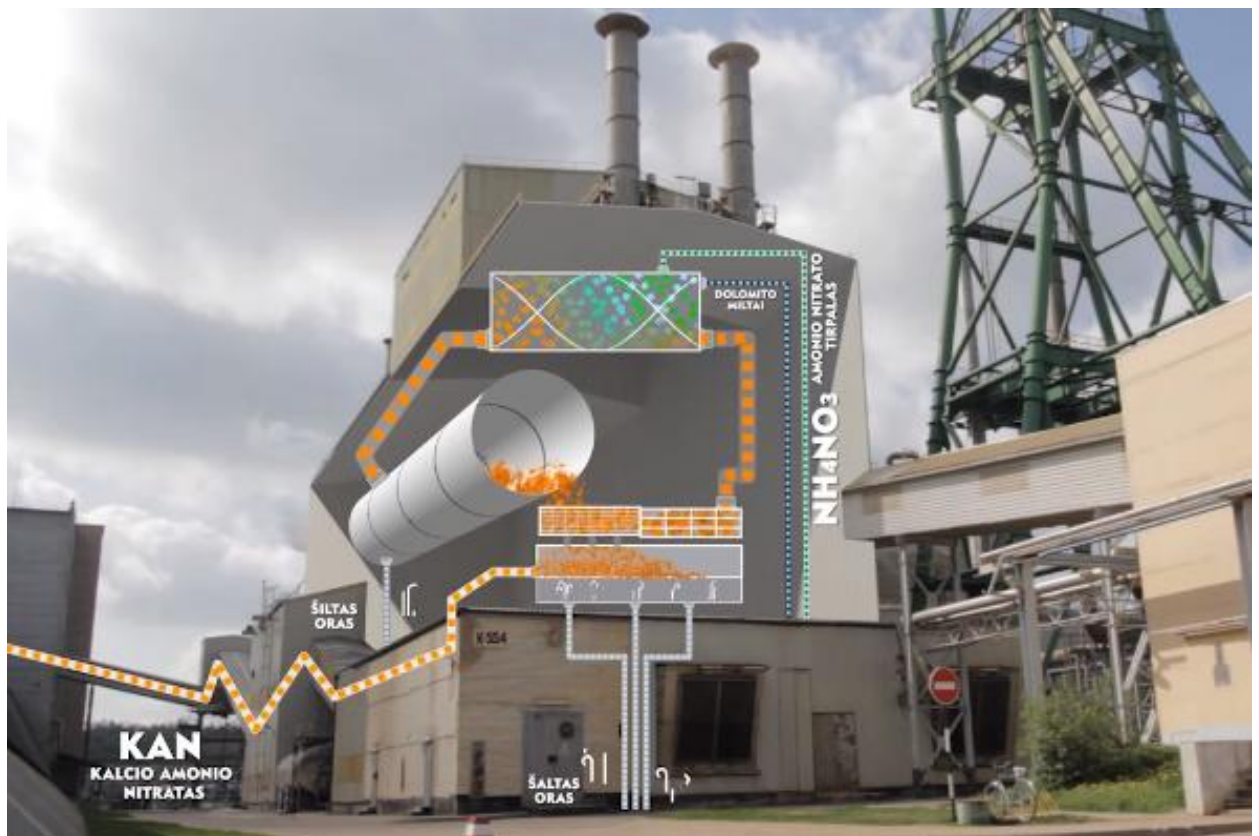
1. bendro azoto kiekis 28 %,
2. produkto granulometrija:
 - < 6,3 mm – 100 %,
 - 1,6 – 4,0 mm – 95 %,
 - < 1,6 mm – ne daugiau 2 %,
 - < 0,63 mm – ne daugiau 0,5 %.

KAN trąšos gaminamos, sumaišant smulkiai sumaltą dolomitą ir 95,5-97,5% AN tirpalą. Amonio nitrato tirpalo koncentraciją riboja KAN granuliavimo būdas ir reikalavimai gatavai produkcijai. Tirpalas maišomas su dolomito arba anhidrito maliniu ir returu (gražinamu į granuliavimą gatavu produktu ir atsijomis). Granuliavimas vykdomas dvivelenyje “pug mill” (pagmil) granulatoriuje, formuojant aglomeracijos principu susidarancias granulės. Naudojamas karštas (130-160 °C) 95,5-97,5 % koncentracijos amonio nitrato tirpalas. Susidaręs mišinys granuliuojamas, džiovinamas, sijojamas, (neatitiktinis produktas trupinamas), aušinamas ir kondicionuojamas produktą nuo sulipimo apsaugančiomis ir drėgmę atstumiančiomis medžiagomis. Kondicionavimui granulės apipurškiamos nelakių stambiamolekulinių organinių aminų tirpalu [3].

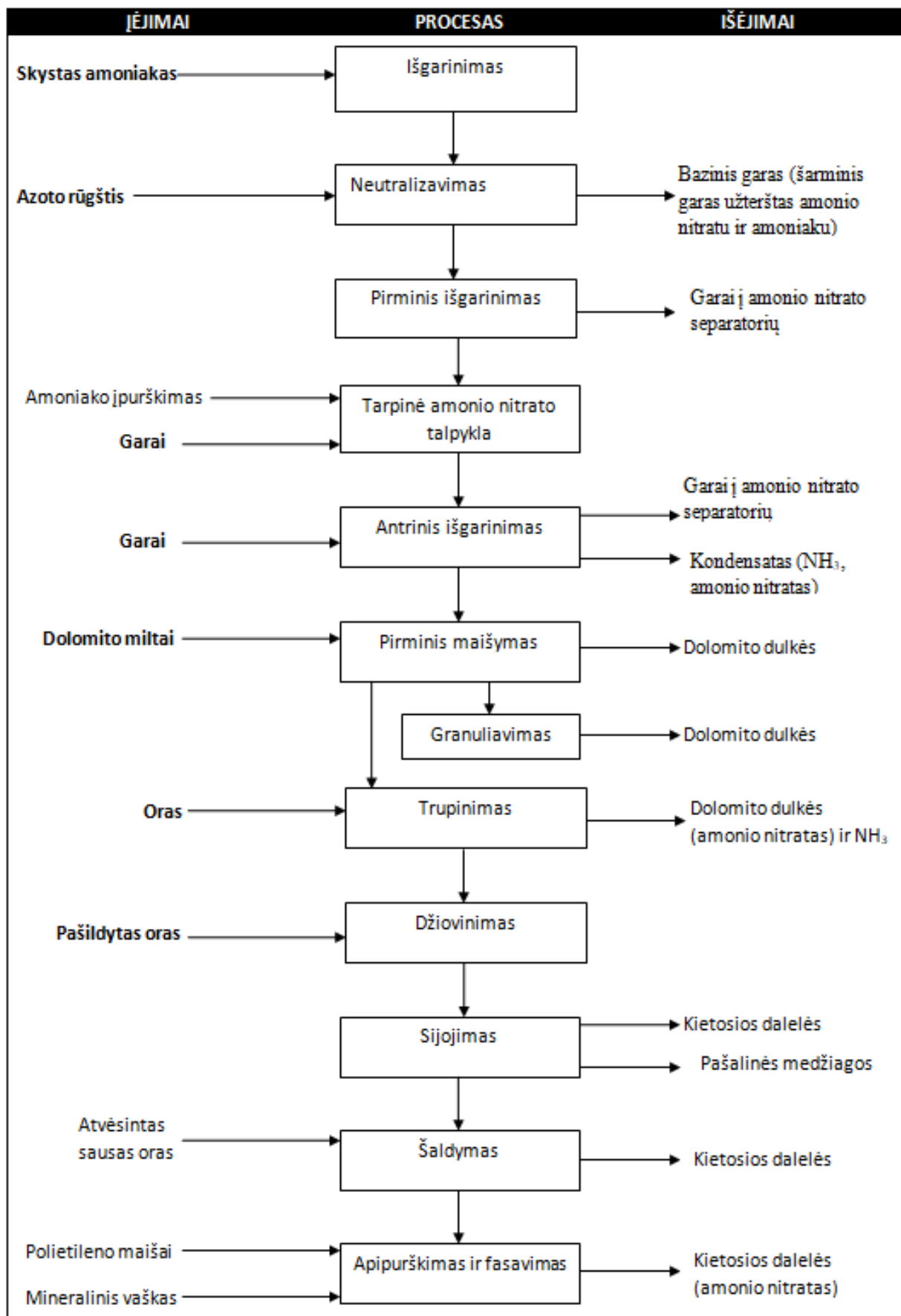
KAN gamybos technologinis procesas susideda iš tokių pagrindinių stadijų:

1. Dolomito skaldos iškrovimas ir sandėliavimas;
2. Dolomito skaldos malimas ir tiekimas kalcio amonio nitrato gamybai;
3. 91,5 - 95 % amonio nitrato tirpalo gamyba:
 - amoniako išgarinimas;
 - neutralizavimas ir pirminis išgarinimas;
 - amonio nitrato tirpalo tiekimas į tarpinę talpyklą poz. F409 arba amonio salietros cecho KAS skyrių;
 - neutralizacijos proceso metu susidariusio bazinio garo (bazinis garas – tai šarminis garas užterštas amonio nitratu ir amoniaku) kondensavimas, šaldymas ir išdavimas į bazinio kondensato valymo stotį [3].
4. Kalcio amonio nitrato gamyba:
 - amonio nitrato tirpalo paruošimas antriniam išgarinimui;
 - antrinis amonio nitrato tirpalo išgarinimas;

- pirminis maišymas;
 - granuliavimas;
 - džiovinimas;
 - sijojimas ir trupinimas;
 - oro kondicionavimas;
 - kondicinių granulių aušinimas;
 - dulkių iš panaudoto oro pašalinimas;
 - produkto kondicionavimas;
 - produkto transportavimas į gatavos produkcijos sandėlį;
5. Gatavos produkcijos sandėliavimas, fasavimas, išsiuntimas;
6. Pagalbinės stadijos yra:
- apytakinio ciklo vandens aušinimas ir tiekimas;
 - bazinio kondensato valymas;
 - 8 bar. suspausto oro tiekimas [3]



5 pav. Kalcio amonio nitrato gamybos proceso vizualizacija



6 pav. Kalcio amonio nitrato gamybos proceso blokinė schema [4]

2.2. Amonio nitrato tirpalo gamybos technologinio proceso aprašymas

Skystas amoniakas iš įmonės tinklo tiekiamas į išgarintuvą. Neutralizacijai reikalingas dujinis amoniakas paruošiamas išgarintuve, kurio vamzdinėje ertmėje cirkuliuoja šiltas vanduo, o tarp vamzdinėje ertmėje garinamas skystas amoniakas. Cirkuliacinis vanduo iš išgarintuvo apatinės dalies nuteka į siurbį, kuriuo per cirkuliacinio vandens pašildytuvą ir šilto cirkuliacinio vandens talpyklą, šiltas vanduo tiekiamas į išgarintuvo viršų. Cirkuliacinio vandens pašildytuvus naudojamas cirkuliacinio vandens pašildymui baziniu garu. Į pašildytuvą tiekiamo bazinio garo kiekis reguliuojamas pagal iš pašildytuvo išeinančio cirkuliacinio vandens temperatūrą. Šilto vandens lygis cirkuliacinio vandens talpykloje yra reguliuojamas, dalį vandens iš cirkuliacinės sistemos nuvedant į grįžtamą apytakinio ciklo vandenį [3].

Slėgis dujinio amoniako talpykloje reguliuojamas į išgarintuvą tiekiamo šilto vandens kiekiu. Lygis išgarintuve reguliuojamas į jį tiekiamo skysto amoniako kiekiu. Apie per didelį amoniako lygį išgarintuve galima spręsti iš temperatūrą registruojančio prietaiso rodmenų. Pakilus lygiui virš 60 %, temperatūra pradeda žemėti. Dujinis amoniakas iš išgarintuvo viršaus nukreipiamas į amoniako talpyklą, kurios dugne sumontuotas vertikalus vamzdinis nusėdintuvas[3].

Dujinio amoniako talpykloje iš dujinio amoniako atsiskiriantys skysčio lašeliai vamzdiniu nusėdintuvu patenka atgal į išgarintuvą [3].

Iš dujinio amoniako talpyklos dujinis amoniakas patenka į amoniako pašildytuvą, kur baziniu garu pašildomas, reguliuojant ją tiekiamo į pašildytuvą bazinio garo kiekiu ir tiekiamas į neutralizatorių [3].

Tepalo iš skysto amoniako pašalinimui iš išgarintuvo apatinės dalies periodiškai išleidžiamas iš skysto amoniako išsiskyres tepalo ir vandens mišinys [3].

Amoniake esančios vandens ir tepalo priemaišos, vykstant nuolatiniam amoniako išgarinimui, koncentruojasi apatinėje išgarintuvo dalyje. Kad išvengti išgarintuvo pajėgumo sumažėjimo bei tepalo priemaišų patekimo į neutralizavimo stadiją, dėl ko gali kilti amonio nitrato skilimo grėsmė, tepalo-vandens mišinys nuolat išleidžiamas iš išgarintuvo apatinės dalies. Skystas amoniakas su vandens ir tepalo priemaišomis iš išgarintuvo patenka į tarpinį amoniako atskirtuvą, kur atskiriamas dujinis amoniakas. Skystoji fazė (tepalo-vandens-amoniako mišinys) iš tarpinio amoniako atskirtuvo patenka į šilumokaitį. Šilumos agentu naudojamas 100 °C temperatūros bazinis kondensatas, tiekiamas iš bazinio kondensato rinktuvo. Šilumokaityje iš skysto tepalo-vandens-amoniako mišinio išgarinamas amoniakas, kuris per galinį amoniako atskirtuvą tiekiamas į dujinio amoniako talpyklą. Skystoji fazė iš šilumokaičio teka į galinį dujinio amoniako atskirtuvą, kur vyksta tolimesnis dujinio amoniako išsiskyrimas iš skystosios fazės [3].

Neutralizuojant azoto rūgštį dujiniu amoniaku pagaminamas 76-80 % AN tirpalas, kuris pirminio išgarinimo metu koncentruojamas iki 91,5-95 % [3].



7 pav. Azoto rūgšties neutralizatorius, amonio nitrato gamybos skyriuje.

Neutralizavimo reakcijoje susidaręs 76-80 % amonio nitrato tirpalas iš neutralizatoriaus per lygį neutralizatoriuje reguliuojantį vožtuvą ir išsiplėtimo talpyklą tiekiamas į pirminio išgarintuvo vamzdinę ertmę. Į išgarintuvo tarpvamzdinę ertmę tiekiamas bazinis garas kaitina vamzdine ertme tekančią AN tirpalą. Garo ežektoriumi išsiurbiant nesusikondensavusias dujas ir kondensuojant bazinį garą bazinio garo kondensatoriuje, pirminio išgarintuvo vamzdinėje ertmėje sudaromas vakuumas. Tai leidžia išgarinti vandenį iš AN tirpalo. Reikalingo vakuumo išlaikymui išsiurbiamas oras. Pirminio išgarintuvo garų atskirtuve išsiskyręs garas su skysčio dalelėmis išsiurbiami per vakuuminę sistemą. Iki 91,5-95 % koncentruotas AN tirpalas panardinamuju vamzdžiu tiekiamas į amonio nitrato tirpalo talpyklą. Šis, baziniu garu šildomas indas sudaro hidraulinę užtvarą vakuuminei sistemai ir veikia kaip surenkamasis indas ir buferis siurblių maitinimui. AN tirpalo lygis talpykloje reguliuojamas padidinant arba sumažinant siurbliais išduodamo tirpalo kiekį [3].

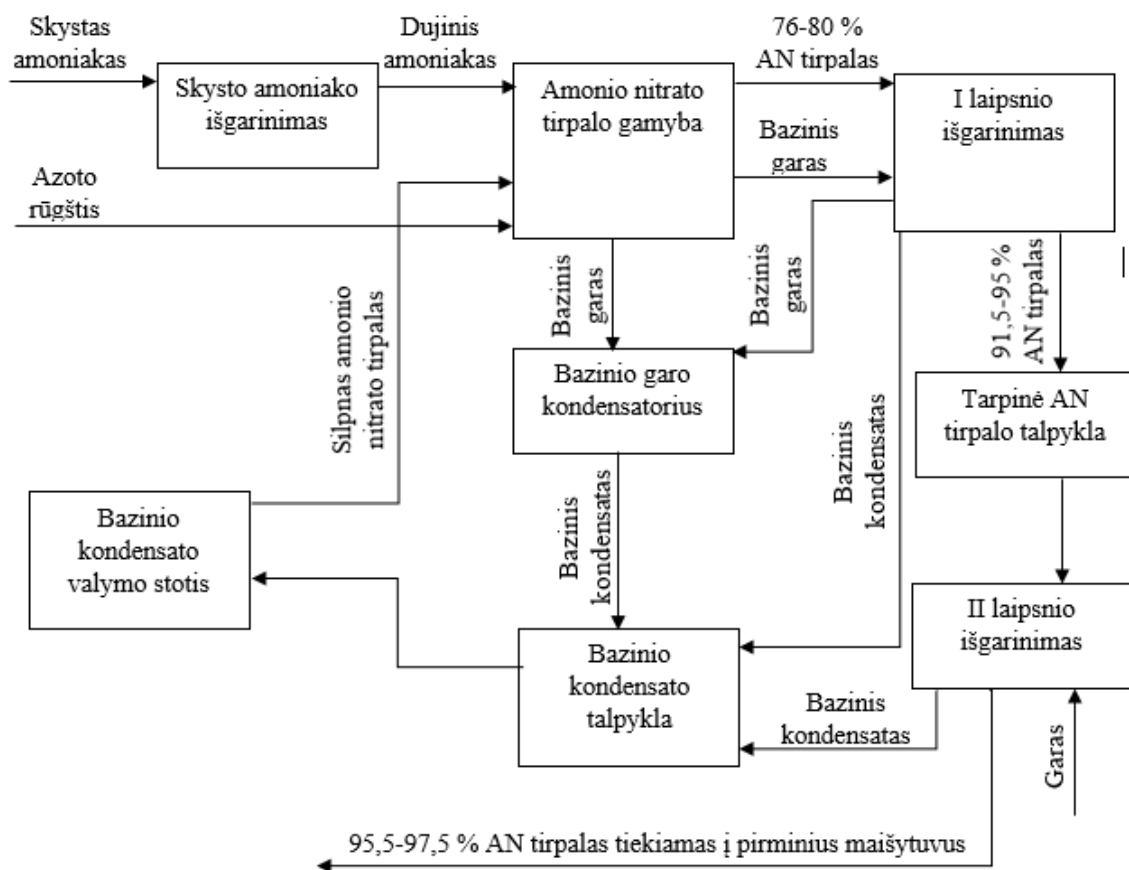
Garai, turintys AN tirpalo priemaišų, iš garų atskirtuvo ir išsiplėtimo talpyklos patenka į bazinio garo kondensatorių. Šalutiniai garo ežektoriaus produktai ir perteklinis bazinis garas kondensuojami bazinio garo kondensatoriuje. Oro, vandens garų ir amoniako mišinys iš šio kondensatoriaus išleidžiamas į atmosferą [3].

Kondensuojantis baziniam garui, susidaro bazinis kondensatas. Bazinis kondensatas surenkamas bazinio kondensato surinkimo talpykloje. Talpykla per bazinio garo kondensatorių sujungta su atmosfera. Iš bazinio kondensato surinkimo talpyklos kondensatas persipila į tarpinę bazinio kondensato talpyklą, į kurią taip pat atiteka kondensatas iš bazinio garo kondensatorių [3].

Iš tarpinės bazinio kondensato talpyklos bazinis kondensatas per bazinio kondensato šaldytuvus, siurbliais per lygio reguliavimo vožtuvą tiekiamas į bazinio kondensato valymo stoties talpyklą. [3]

Kondensatoriuje susidaręs bazinis kondensatas, turintis amoniako priemaišų, nukreipiamas į silpno amonio nitrato talpyklą ir panaudojamas neutralizatorių reakcinės zonos temperatūros reguliavimui [3].

91,5-95 % amonio nitrato tirpalas iš talpyklų siurbliais per lygio talpyklose reguliavimo vožtuvus tiekiamas į tarpinę talpyklą. Amonio nitrato tirpalas iš tarpinės talpyklos siurbliais tiekiamas į antro laipsnio išgarintuvus. Išgarinimo stadijoje amonio nitrato tirpalas, koncentruojamas iki 95,5-97,5 %, priklausomai nuo drėgmės kiekio, reikalingo granuliacijoje. Koncentruotas amonio nitrato tirpalas iš hidroužtvarų savitaka tiekiamas į pirminius maišytuvus, į kuriuos taip pat tiekiami dolomito arba anhidrito miltai, arba šių miltų mišinys [3].



8 pav. Amonio nitrato gamybos schema.

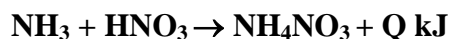
2.3. Azoto rūgšties neutralizatoriuje vykstančio technologinio proceso aprašymas

Iš amoniako pašildytuvo dujinis amoniakas, kurio temperatūra 70-120 °C, per reguliuojantį vožtuvą tiekiamas į neutralizatoriaus apatinėje dalyje esančią reakcijos zoną [3].

Azoto rūgštis, kurios koncentracija 56-59 %, iš azoto rūgšties gamybos agregato tiekama į azoto rūgšties pašildytuvą, kur garais pašildoma iki $30 \div 80$ °C temperatūros. Pašildymo temperatūra reguliuojama į pašildytuvą tiekiamo garo kiekiu. Iš azoto rūgšties gamybos agregato gaunant 30-80 °C temperatūros azoto rūgštį, dirbama atjungus pašildytuvą, per apvadą [3].

Iš pašildytuvo arba per jo apvadą, azoto rūgštis nukreipiama į azoto rūgšties neutralizatorių. Neutralizatorius turi apsaugą nuo per didelio užpildymo ir nuolatinį amonio nitrato tirpalo pH vertės matavimo įrenginį [3].

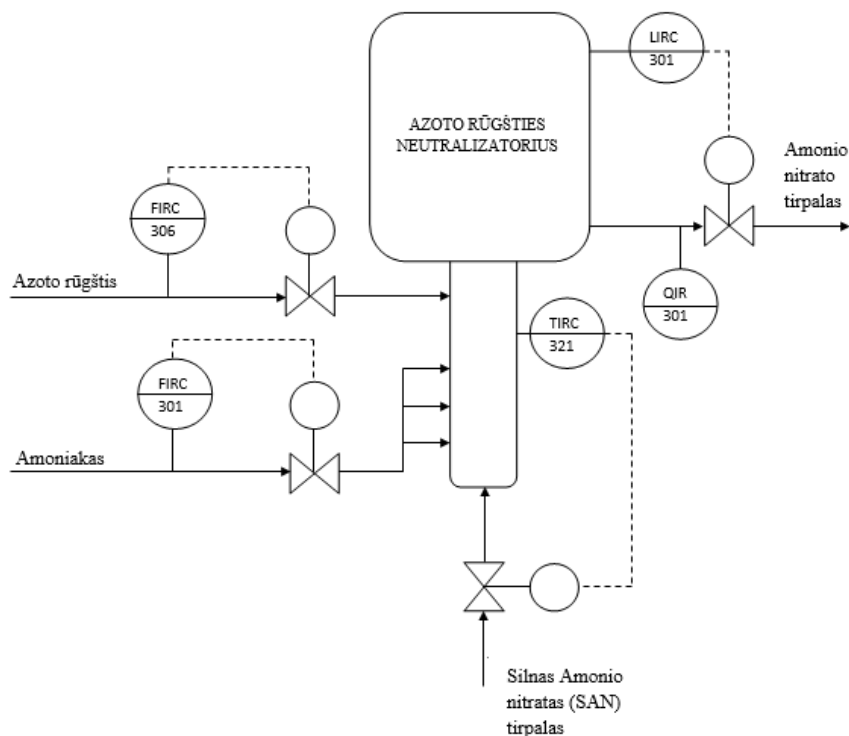
Neutralizatoriuje vyksta reakcija:



Vykstant šiai reakcijai, šalutiniai produktai nesusidaro, išsiskiria 144,1 kJ šilumos. Kadangi gamybai naudojama 56-59 % azoto rūgštis, dėl to šiluminis efektas yra mažesnis tiek, kiek šilumos reikia sunaudoti rūgščiai praskiesti. Neutralizavimo metu išsiskyrusi šiluma yra panaudojama daliniam tirpalo išgarinimui, t. y., jo koncentracijai padidinti. [3]

Temperatūra reakcijos zonoje reguliuojama į neutralizatoriaus apačią tiekiamo silpno amonio nitrato (SAN) kiekiu [3].

Reakcijos metu susidaro amonio nitrato tirpalas ir išsiskiria vandens garas. Nedidelė amoniako dalis pereina į vandens garą ir sudaro bazinį garą (bazinis garas – tai garas užterštas amonio nitratu ir amoniaku). Iš neutralizatoriaus išėjęs bazinis garas patenka į dviejų pakopų nuosekliai sujungtus lašų atskirtuvus, kur iš bazinio garo išsiskyrę skysčio lašeliai nuteka atgal į neutralizatorių. Bazinis garas naudojamas kaip šilumos agentas. Perteklinis bazinis garas kondensuojamas bazinio garo kondensatoriuje [3].



9 pav. Azoto rūgšties neutralizatoriaus schema su technologinių parametų matavimo taškais

2.4. Amonio nitrato technologinio gamybos proceso stebėsenos sistemos

Amonio nitrato gamybos procese vieni iš svarbiausių iššūkių yra kokybės ir produktyvumo gerinimas. Tam tikrais atvejais šios iššūkius išspręsti padeda automatizuotu valdymo ir stebėjimo sistemų naudojimas bei šių sistemų tobulinimas. Labiausiai paplitęs azoto rūgšties neutralizavimo proceso valdymas yra stebėti HNO_3 ir NH_3 stochiometrija naudojant pH matavimo jutiklius [17]. Tačiau remiantis įvairiais pramoniniais literatūros šaltiniais, atlikti pH kontrolę nėra paprastas uždavinys, nes reikalinga palaikyti aukštą amonio nitrato (AN) temperatūrą, su tikslų išvengti produkto kristalizavimosi [18]. Šiuo metu amonio nitrato gamyboje eksploatuojami amonio nitrato praskiedimo šaltu garo kondensatu arba tyrų vandenių bakeliai, siekiant išvengti pH elektrodo perkaitinimo.



10 pav. Amonio nitrato pH matavimo sistema

pH (vandenilio potencialas) vandenilio jonų (H^+) koncentracijos tirpale matas, parodantis tirpalo rūgštingumą ar šarmingumą. pH reikšmė matuojama skalėje nuo 0 iki 14, kur $\text{pH} < 7$ rūgštiniais tirpalams, $\text{pH} = 7$ neutraliems tirpalams ir $\text{pH} > 7$ šarminiais tirpalams [19].

Dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautams stebėti naudojamas skirtuminio slėgio metodas, panaudojant siaurinio įtaisą (diafragmą) sukuriama slėgių skirtumas [20]. Slėgių skirtumą fiksuoja elektroninis skirtuminio slėgio manometras. Siaurinančio įtaiso veikimo principas, keičiantis tekančios medžiagos greičiui, keičiasi statinis slėgis. Tokių matavimo sistemų privalumai yra ilgaamžiškumas ir patikimumas, tinka skysčiams ir dujoms vienodai kokybiškai, atsparus nusidėvėjimui.

3. Azoto rūgšties neutralizavimo proceso kaip valdymo objekto tyrimas

Šiame skyriuje aprašomas tyrimas, atliktas amonio nitrato gamybos agregate, tiriant azoto rūgšties neutralizavimo dujinių amoniakų sistemą. Pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai bei duomenų aprosimavimas tipinėmis perdavimo funkcijomis.

3.1. Šuolinės reakcijos eksperimentas perdavimo funkcijų nustatymui

Veikiančiame kalcio amonio nitrato gamybos agregate atlikti šuolinės reakcijos eksperimentus yra ganėtina rizikinga, reikia nepažeisti technologinių sąlygų. Nedideli dujinio amoniako ar azoto rūgšties reguliuojančių vožtuvų padėties pokyčiai turi didelę įtaką srauto pokyčiui, dėl ko kinta azoto rūgšties ir dujinio amoniako srautų santykis, o tai gali turėti neigiamos įtakos galutinio produkto kokybei, atsiranda didesni nei įprasta bazinio garo kiekiai. Jei neutralizavimo metu pagaminto produkto $\text{pH} < 1$, išgarinimo metu gali prasidėti terminis amonio nitrato skilimas.

Atlikti du skirtingi šuolinės reakcijos eksperimentai veikiančiame amonio nitrato gamybos agregate. Pagrindinis tikslas atliekant šio tipo eksperimentus yra naudoti ko mažesni trikdantįjį poveikį, kuris nesukeltų valdomo proceso dinaminių savybių pokyčio, nes mažesnis pokytis geriau atspindi proceso dinamines savybes tiriamo būsenos taško aplinkoje. Pirmojo eksperimento metu pakeičiant azoto rūgšties reguliuojančio vožtuvo padėtį buvo stebimas azoto rūgšties srauto pokytis. Antrojo eksperimento metu pakeičiant dujinio amoniako reguliuojančio vožtuvo padėtį ir įtakojus dujinio amoniako srauto pokyčius buvo stebimas amonio nitrato tirpalo pH pokytis ir abiejų srautų santykis. Antrojo eksperimento metu, kada buvo pakeista amoniako vožtuvo padėtis, azoto rūgšties neutralizatoriaus aplinka (amonio nitrato gamybos skyriuje) užteršiama amoniaku. Todėl atliekant tokio tipo eksperimentą reikia užtikrinti, kad vykstant eksperimentui agregate nebūtų žmonių.

Pirmojo eksperimento metu šuoliškai pakeista azoto rūgšties srautą reguliuojančio vožtuvo padėtis, užfiksuotas azoto rūgšties srauto pokytis. Reguluojančio vožtuvo padėtis pakeista iš 31,73% į 34,92%. Eksperimento metu gauti duomenys pateikiami 9-oje lentelėje

9 lentelė. Azoto rūgšties srauto pokytis pakeitus azoto rūgšties vožtuvo padėtį

Laikas, (s)	HNO ₃ Vožtuvo padėtis, (%)	ΔU	HNO ₃ srautas, (kg/h)	ΔY
0	31,73→34,92	0	22449,406	0
6	34,92	3,19	24045,928	1596,522
18	34,92	3,19	24716,676	2267,27
21	34,92	3,19	24716,676	2267,27
30	34,92	3,19	24716,676	2267,27



11 pav. Azoto rūgšties srautą reguliuojantis vožtuvas.

Antrojo eksperimento metu pakeista dujinio amoniako srautą reguliuojančio vožtuvo padėtis, užfiksuota kaip į šį pokytį reaguoja amonio nitrato tirpalo pH matavimas. Reguluojančio vožtuvo padėtis pakeista iš 23.62% į 29.22%. Eksperimento metu išmatuotos amonio nitrato pH vertės pateikiamos 10-oje lentelėje.

10 lentelė. Amonio nitrato pH kitimas eksperimento metu

Laikas, (s)	Dujinio NH ₃ Vožtuvo padėtis, (%)	ΔU	pH reikšmė	ΔY
0	23,62→29,22	0	3,4815	0
10	29,22	5,6	3,4815	0
20	29,22	5,6	3,4815	0
30	29,22	5,6	3,4815	0
40	29,22	5,6	3,6855	0,204
50	29,22	5,6	4,9061	1,4246
60	29,22	5,6	6,2434	2,7619
70	29,22	5,6	6,8576	3,3761
80	29,22	5,6	7,1259	3,6444
90	29,22	5,6	7,26	3,7785
100	29,22	5,6	7,345	3,8635
110	29,22	5,6	7,4046	3,9231
120	29,22	5,6	7,4481	3,9666
130	29,22	5,6	7,49	4,01
140	29,22	5,6	7,5256	4,0441
150	29,22	5,6	7,547	4,0655
160	29,22	5,6	7,5905	4,109
170	29,22	5,6	7,6115	4,13
180	29,22	5,6	7,6316	4,1501



12 pav. Dujinio amoniako srautą reguliuojantis vožtuvas.

Atliekant antrąjį eksperimentą užfiksuotas dujinio amoniako srauto pokytis. Eksperimento metu išmatuotos dujinio amoniako srauto vertės pateikiamos 11-oje lentelėje.

11 lentelė. Dujinio amoniako srauto kitimas eksperimento metu

Laikas, (s)	Dujinio NH ₃ Vožtuvo padėtis, (%)	ΔU	NH ₃ srautas, (kg/h)	ΔY
0	23,62→29,22	0	5062,475	0
10	29,22	5,6	5545,052	482,577
20	29,22	5,6	5761,103	698,628
30	29,22	5,6	5864,477	802,002
40	29,22	5,6	5864,477	802,002
50	29,22	5,6	5864,477	802,002
60	29,22	5,6	5864,477	802,002
70	29,22	5,6	5864,477	802,002
80	29,22	5,6	5864,477	802,002
90	29,22	5,6	5864,477	802,002
100	29,22	5,6	5864,477	802,002
110	29,22	5,6	5864,477	802,002
120	29,22	5,6	5864,477	802,002
130	29,22	5,6	5864,477	802,002
140	29,22	5,6	5864,477	802,002
150	29,22	5,6	5864,477	802,002
160	29,22	5,6	5864,477	802,002
170	29,22	5,6	5864,477	802,002
180	29,22	5,6	5864,477	802,002

Antrojo eksperimento metu buvo fiksuojamas dujinio amoniako srauto pokytis, azoto rūgšties srautą reguliuojančiojo vožtuvo padėtis nebuvo keičiama. Eksperimento metu išmatuoti dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautai, o jų santykio skaičiavimas pateiktas 12-oje lentelėje.

12 lentelė. Dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykio kitimas eksperimento metu

Laikas, (s)	Dujinio NH ₃ Vožtuvo padėtis, (%)	ΔU	NH ₃ srautas, (kg/h)	HNO ₃ srautas, (kg/h)	Santykis
0	23,62→29,22	0	5062,475	35131,664	6,94
10	29,22	5,6	5545,052	35131,664	6,34
20	29,22	5,6	5761,103	35131,664	6,10
30	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
40	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
50	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
60	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
70	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
80	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
90	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
100	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
110	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
120	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
130	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
140	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
150	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
160	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
170	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99
180	29,22	5,6	5864,477	35131,664	5,99

3.2. Proceso perdavimo funkcijų identifikavimas eksperimentiniais duomenimis

Pagrindinė šuolinės reakcijos identifikavimo strategija yra pritaikyti teorines šuolinės reakcijos funkcijas prie eksperimentiškai išmatuotos šuolinės reakcijos duomenų [2].

Amonio nitrato gamybos, azoto rūgšties neutralizatoriaus automatinio valdymo sistemos struktūrinėje schemoje pateiktoms perdavimo funkcijoms W_1 ir W_2 parenkami modeliai – kandidatai [2], naudojami proceso reakcijų kreivėms aprašyti.

Įvertinus eksperimentinius duomenis pateiktus 9-oje lentelėje, pastebėta, kad reakcijos kreivėje dominuoja pirmos eilės dinamika, todėl nuspręsta, azoto rūgšties srauto kitimą esant azoto rūgšties reguliuojančio vožtuvo padėties pokyčiui aprašyti pirmos eilės perdavimo funkcija.

$$W_1 = \frac{K_1}{T_1s + 1} \quad (3)$$

Įvertinus eksperimentinius duomenis pateiktus 10-oje lentelėje, reakcijos kreivę nuspręsta aprašyti antros eilės perdavimo funkcija su vėlavimu, nes azoto rūgšties neutralizatoriuje keičiantis dujinio amoniako srautui pH reakcijos kreivėje dominuoja aukštesnės nei pirmos eilės dinamika. Naudojama tokia perdavimo funkcija:

$$W_2 = \frac{K_2}{T_2^2 s^2 + 2T_2 s + 1} e^{\tau s} \quad (4)$$

Remiantis eksperimentiniais duomenimis perdavimo funkcijoms W_1 ir W_2 apskaičiuojami stiprinimo koeficientai K_1 ir K_2 :

$$K = \frac{y(\infty)}{\Delta U} \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{2267,27}{3.19} = 710.74 \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{4,15}{0,95} = 4,37 \quad (7)$$

Atliktas parametų identifikavimas, kuomet modeliuojamos reakcijos kreivės palyginamos su eksperimentiniais duomenimis. Modelio parametų identifikavimo uždavinys formuluojamas kaip optimizavimo uždavinys, kuriuo tikslas yra minimizuoti nuokrypių kvadratų sumą [1].

$$S = \sum_{i=1}^n (y_e(t_i) - y(t_i))^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

Identifikavimo uždaviniui spręsti ir procesui modeliuoti patogiu naudoti perdavimo funkcijos modelio sprendinį, kai proceso įėjime veikia vienetinis trikdys. Perdavimo funkcijai W_1 modelio sprendinio bendra forma atrodo taip:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } 0 \leq t < \tau_{pr} \\ K_{pr} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right), & \text{kai } 0 \geq \tau_{pr} \end{cases} \quad (9)$$

Perdavimo funkcijai W_2 modelio sprendinio bendra forma atrodo taip:

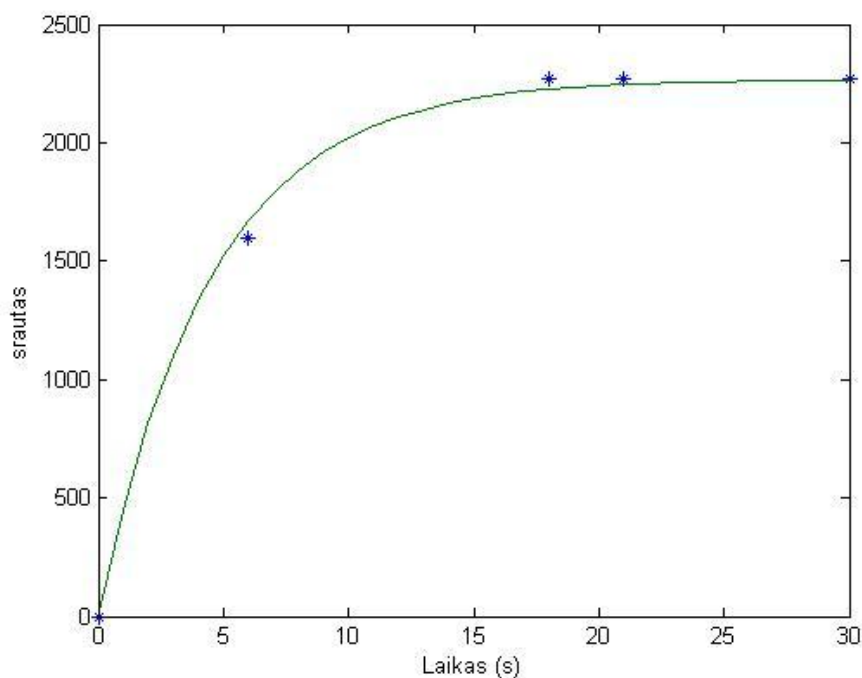
$$y(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } 0 \leq t < \tau_{pr} \\ K_{pr} \left(1 - \left(1 + \frac{t - \tau_{pr}}{T} \right) \exp\left(-\frac{t - \tau_{pr}}{T}\right) \right), & \text{kai } 0 \geq \tau_{pr} \end{cases} \quad (10)$$

Naudojant chemotaksis paieškos algoritmą identifikuojami nežinomi perdavimo funkcijų parametrai. Atlikus parametų identifikavimą gaunamos tokios perdavimo funkcijos:

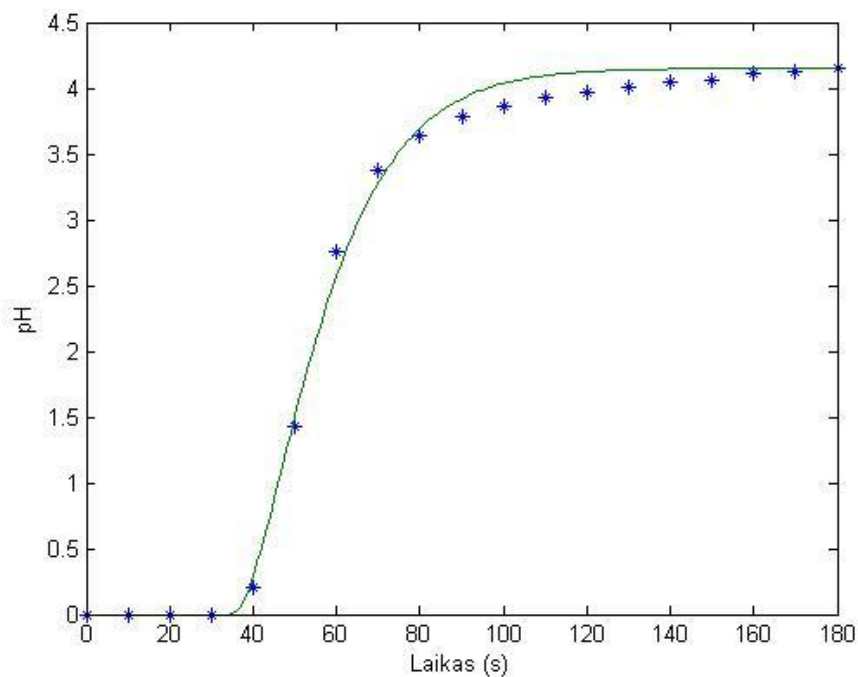
$$W_1 = \frac{710,74}{4,47s + 1} \quad (11)$$

$$W_2 = \frac{4,37}{(11,2s + 1)(11,2s + 1)} e^{35,17s} \quad (12)$$

Patikrinamas modelis, identifikuotų reakcijos kreivių palyginimai su eksperimentiniais duomenimis atitinkamai pateikiami 14-ame ir 15-ame pav. Identifikuotų modelių reakcijos kreivės pavaizduotos ištisinėmis linijomis, o eksperimentiniai duomenys žvaigždutėmis.



13 pav. Srauto pokytis aprašytas perdavimo funkcija W_1 , modelio reakcijos kreivių palyginimas su eksperimentiniais duomenimis



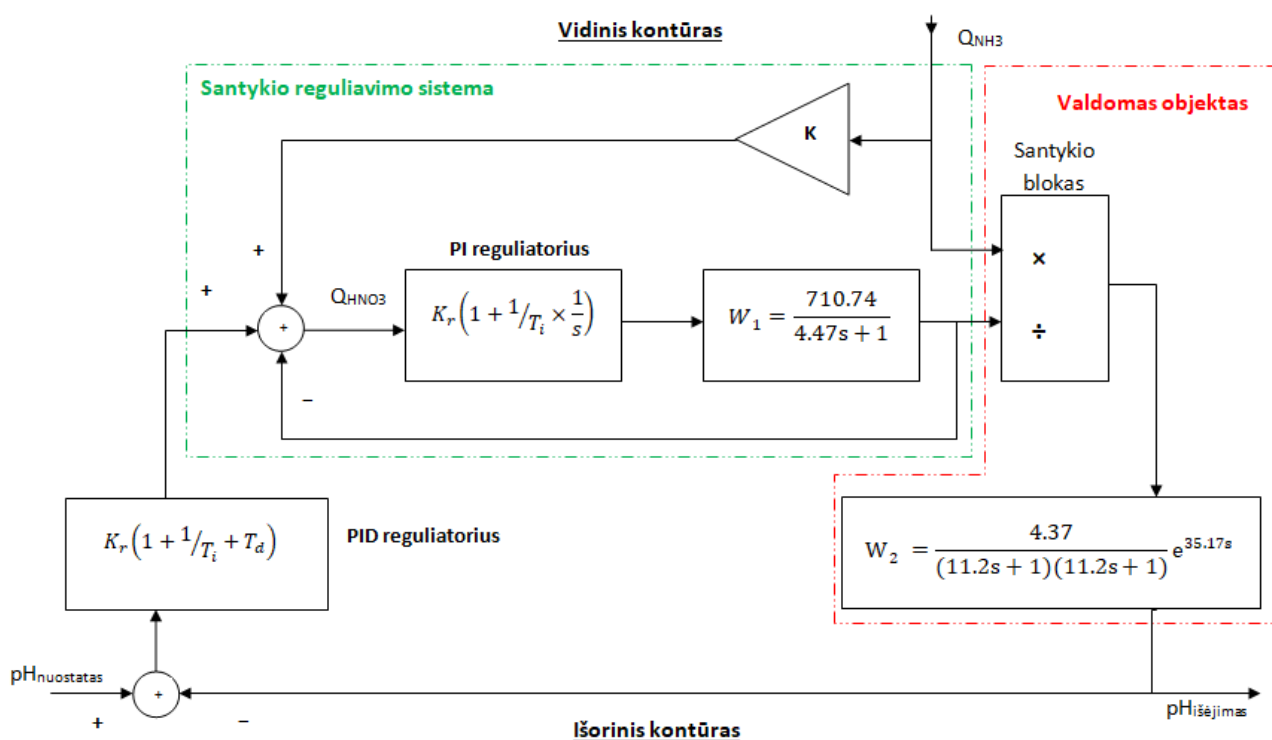
14 pav. Amonio nitrato pH kitimas aprašytas perdavimo funkcija W_2 , modelio reakcijos kreivių palyginimas su eksperimentiniais duomenimis

4. Valdymo sistemos modelis

Šiame skyriuje pateikiamas naujai sukurtas azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos modelis, valdomo objekto matematinis modelis identifikuotas trečiajame skyriuje. Naudojant įvairius derinimo metodus nustatomi valdymo sistemos reguliatorių parametrai. Proceso reguliavimo reakcijos kreivių, kurių derinimas atliktas naudojant skirtingus derinimo metodus, palyginimas ir analizė.

4.1. Valdymo sistemos struktūra

Siekiant pagerinti valdymo kokybę, sukurta azoto rūgšties neutralizatoriaus kaskadinio valdymo sistema. Kaskadinės valdymo sistemos vidiniame kontūre realizuota srautų santykio reguliavimo sistema. Azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos struktūra pateikiama 15 pav.



15 pav. Azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos struktūra

Pavaizduotoje valdymo sistemoje PI ir PID reguliatorių parametrų nustatymas aprašytas 4.2 poskyryje. Modeliuojant ir derinant azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos modelį naudojamas Matlab/Simulink programinis paketas. Kaskadinio valdymo sistemos vidiniame kontūre, užtikrinamas dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykis, o išorinis valdymo sistemos kontūras stabilizuoja gaminamo produkto (amonio nitrato) pH, koreguojant srautų santykio nuostatą. Proceso perdavimo funkcijos W_1 ir W_2 identifikuotos 3.2 poskyryje.

4.2. Azoto rūgšties neutralizatoriaus valdymo sistemos kontūrų modeliavimas ir derinimas

4.2.1. Vidinis kontūras

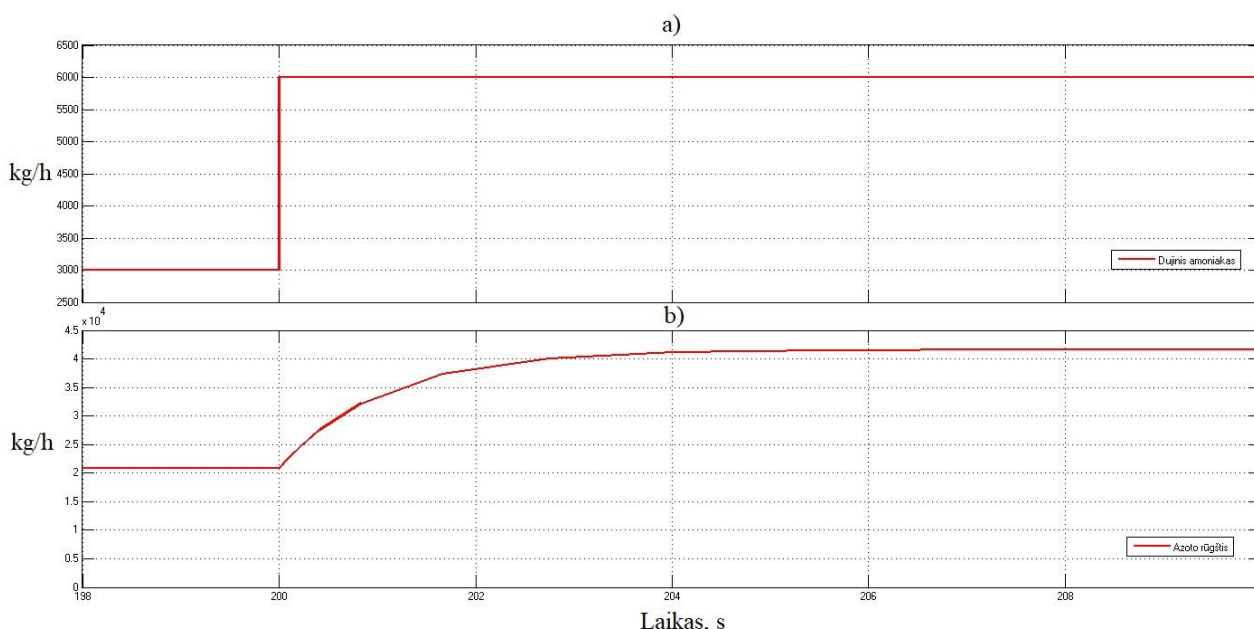
Pirmasis modeliuojamas kontūras yra vidinis, atsakingas už dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykį, kuriame dujinis amoniakas yra nevaldomas parametras, o azoto rūgšties srauto nuostatas nustatomas dujinio amoniako vertę padauginus iš konstantos. Šių srautų santykio valdymo sistema modeliuojama naudojant eksperimentiškai nustatytą perdavimo funkciją $W_1(s)$. Vidinio valdymo sistemos kontūro valdymui parinktas PI reguliatorius.

Įvertinus $W_1(s)$ proceso modelį bei siekiant suprojektuoti valdymo sistemą kokybiškai reaguojančia į nuostato pokyčius. Dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykio reguliatoriaus parametru nustatymui naudojamos vidinio modelio valdymo (IMC) derinimo taisyklės žemosios eilės derinimo modeliams, kur PI reguliatoriaus parametrai apskaičiuojami taip:

$$K_r = \frac{T_{pr}}{T_f K_{pr}} = 4,47 / 710,74 = 0,006 \quad \text{kur, } T_f > 0,2T_{pr} \quad (13)$$

$$T_i = T_{pr} = 4,47 \quad (14)$$

Pagal IMC derinimo taisyklės apskaičiuotus derinimo parametrus įvedus į reguliatorių, gaunamos tokios reakcijos kreivės, kuriose šuoliškai pasikeitus dujinio amoniako srautui (16 a pav.) azoto rūgšties srautas (16 b pav.) pasikeičia tiek kiek pasikeičia dujinio amoniako srautas padaugintas iš konstantos, kuri eksperimento metu buvo lygi 6,94. Pradinis dujinio amoniako srautas buvo 3000 kg/h, po 200 s amoniako srautas šuoliškai pakeičiamas iki 6000 kg/h.



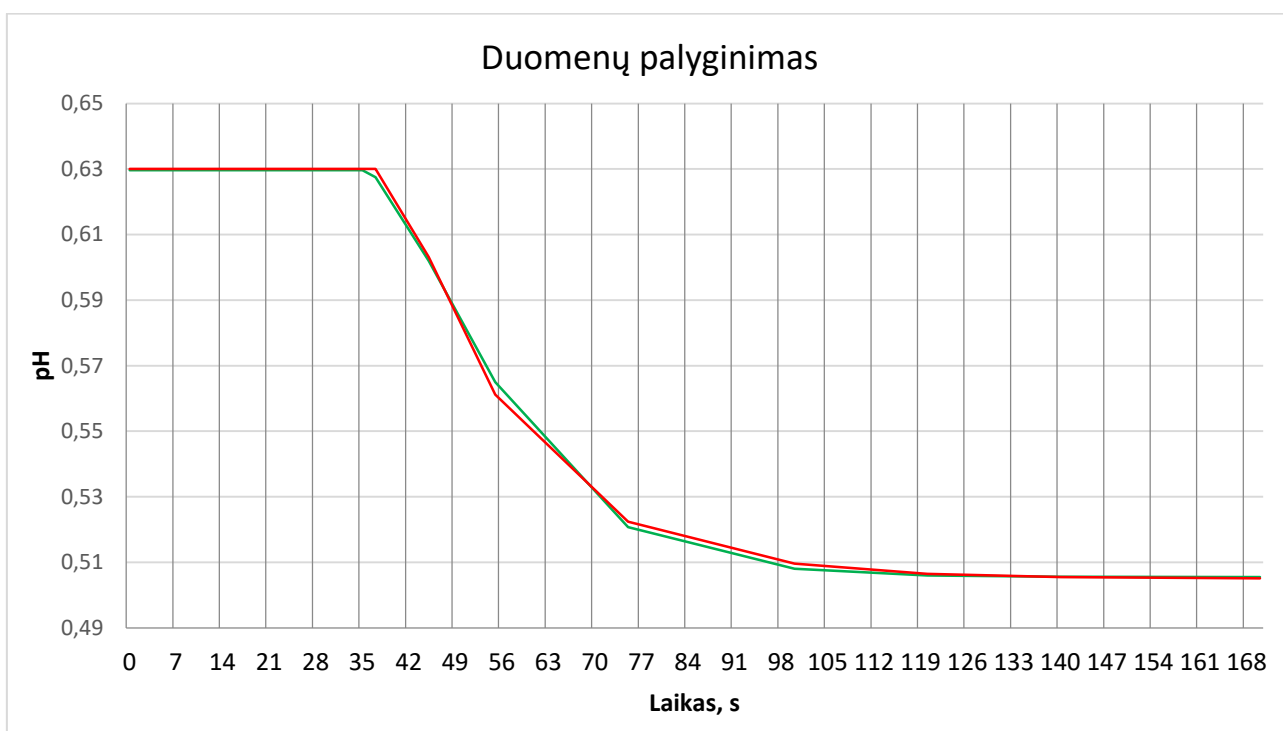
16 pav. Azoto rūgšties srauto reakcija (b), kai šuoliškai pakeičiamas dujinio amoniako srautas (a)

Vidinio kontūro PI reguliatoriui parenkami IMC derinimo metodu nustatyti parametrai, gaunama uždaro kontūro reakcija kurioje nėra perreguliavimo, o reakcija nusistovi greitai.

4.2.2. Išorinis kontūras

Antrasis modeliuojamas kontūras yra išorinis, kurio paskirtis stabilizuoti pH koreguojant dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykį. Šis valdymo sistemos kontūras modeliuojamas naudojant eksperimentiškai nustatytą perdavimo funkciją $W_2(s)$. Išorinio valdymo sistemos kontūro valdymui parinktas PID reguliatorius.

PID reguliatoriaus parametrų nustatymui Matlab/Simulink aplinkoje buvo atliktas modeliavimo eksperimentas, tam tikru laiko momentu įvedamas 10000 kg/h azoto rūgšties srauto pokytis, tokių būdų pakeičiamas dujinio amoniako ir azoto rūgšties srautų santykis bei fiksuojamas pH kitimas. Naudojant skaitmeninius metodus atliktas eksperimentinės reakcijos kreivės (raudona linija) palyginimas su modeliuojama reakcijos kreive (žalia linija) 18 pav.



17 pav. Eksperimentinių (raudona linija) ir modeliavimo (žalia linija) duomenų palyginimas

Apskaičiuojamas stiprinimo koeficientas:

$$K_3 = \frac{y(\infty)}{\Delta U} = \frac{-0,125}{10000} = -0,0000125 = -1,25 \times 10^{-5} \quad (15)$$

Laiko pastovioji T ir vėlinimo laikas τ randami naudojant chemotaksinės paieškos algoritmą ir gaunami tokie parametrai $T = 11,18$ ir $\tau = 35,12$. Šie parametrai naudojami PID reguliatoriaus parametrų nustatymui naudojant skirtingas reguliatorių derinimo taisykles. Atlikus PID reguliatorių parametrų nustatymo skaičiavimus, duomenys pateikiami 13-oje lentelėje. Regulatoriaus parametrų nustatymams apskaičiuoti išbandomi tokie derinimo metodai: Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodas, Cohen-Coon ir integralinių kriterijų optimizavimu paremtas derinimo taisykles (ISE, IAE ir ITAE).

13 lentelė. PID reguliatorių parametų nustatymo skaičiavimai.

Reguliatorių derinimo metodas	Regulatoriaus parametrai		
	K_r	T_i	T_d
Reguliatorių derinimo formulės ir apskaičiuotos parametų vertės			
Ziegler-Nichols	$\frac{1,2T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}}$	$2\tau_{pr}$	$0,5\tau_{pr}$
	-30560,364	70,24	17,56
Cohen-Coon	$\frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(1,33 + \frac{\tau_{pr}}{4T_{pr}} \right)$	$\frac{32 + 6\tau_{pr}/T_{pr}}{13 + 8\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$	$\frac{4}{11 + 2\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr}$
	-53871,071	46,83	8,128
ITAE	$\frac{1,357}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947}$	$\frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738}$	$0,381 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995}$
	-37484,535	30,90	13,3
IAE	$\frac{1,435}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,921}$	$\frac{T_{pr}}{0,878} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,749}$	$0,348 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,914}$
	-40003,785	30,01	11,1
ISE	$\frac{1,495}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,945}$	$\frac{T_{pr}}{1,101} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,771}$	$0,560 \times T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{1,006}$
	-40547,088	24,54	19,8

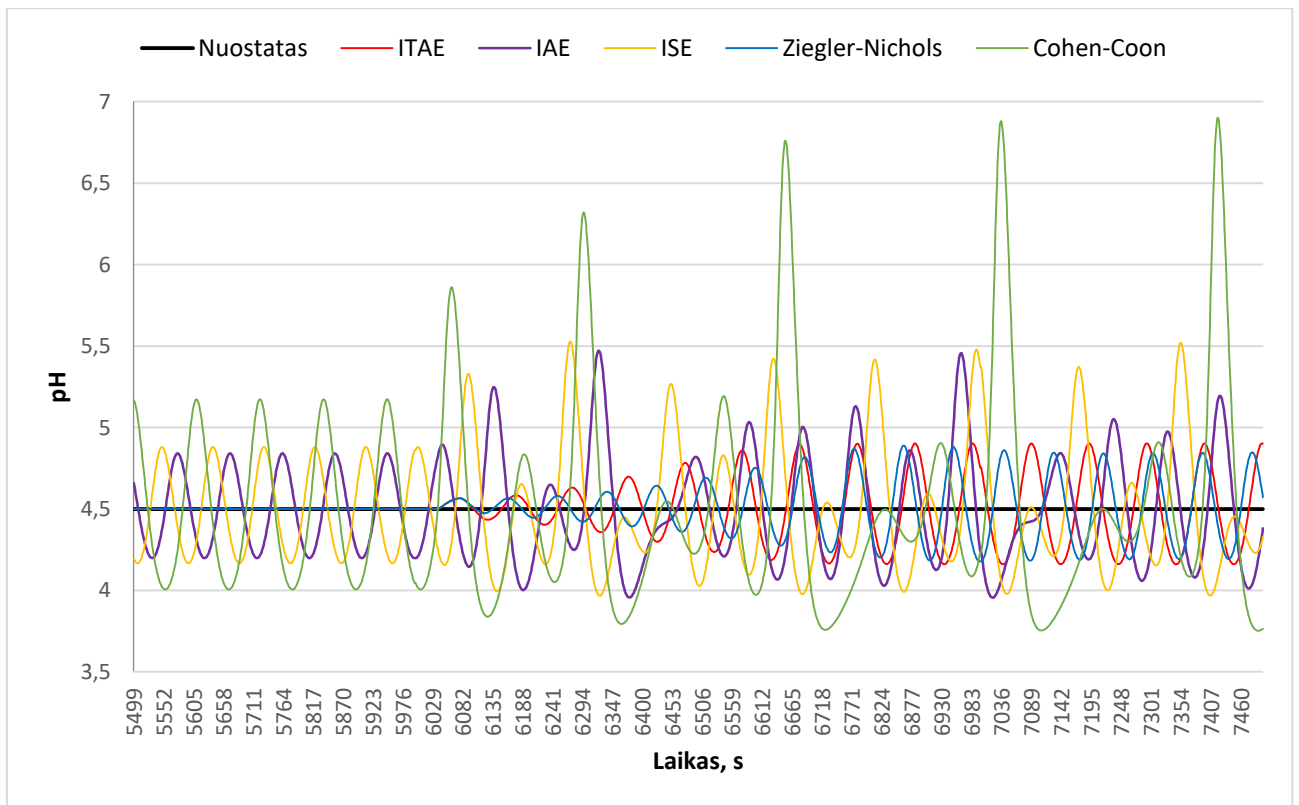
Valdymo sistemoje realizuojamas diskretinis PID reguliatoriaus algoritmas:

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n \quad (16)$$

kur Δu_n apskaičiuojamas taip:

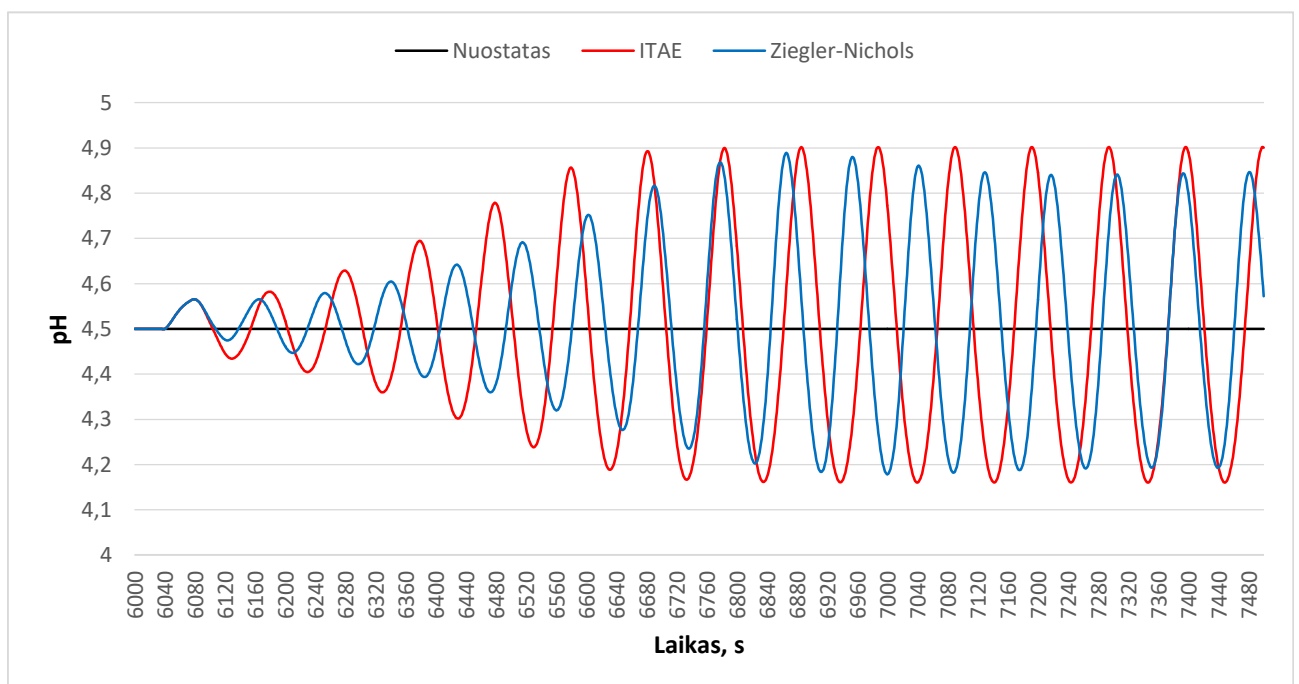
$$\Delta u_n = K_r \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right] \quad (17)$$

Automatinio reguliavimo sistema turi būti efektyvi, o jai keliamas valdymo tikslas užtikrinti pageidaujama reguliavimo kokybę ir kompensuoti trikdantįjį poveikį. Tikslui pasiekti naudoti skirtingais metodais nustatyti PID reguliatorių parametrai, kurie pateikti 13 lentelėje. Esant nusistovėjusiam procesui, 6000 – ają sekundę šuoliškai pakeičiamas dujinio amoniako srautas nuo 5600 kg/h iki 4600kg/h. Iš 18 pav. pateiktų ARS pH reakcijos kreivių matyti, kad sistema nėra stabili, prieš pakeičiant dujinio amoniako srautą nusistovėjusios tik dvi reakcijos kreivės, kuriose reguliatoriaus parametų nustatymui naudotos ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo metodikos.



18 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, reguliatorių derinimui naudojant Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, ITAE, IAE ir ISE derinimo metodus.

ISE, IAE ir Cohen-Coon metodais suderintos sistemos rodo ženkliai prastesnius modeliavimo rezultatus, todėl šiais metodais nustatyti reguliatorių parametrai sekančiose bandymuose nebus naudojami.



19 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus.

Modeliuojamas procesas turi žymų vėlavimą, dėl to esant dideliame reguliatoriaus stiprinimui suprastėja sistemos stabilumas. Procesams su tokiomis dinaminėmis savybėmis ($\tau_{pr}/T_{pr} > 1$) nėra sudaryta reguliatorių derinimo taisyklių. Dėl to, suderinus reguliatorių naudojant tipines derinimo taisykles, būtina atlikti reguliatoriaus stiprinimo koregavimą.

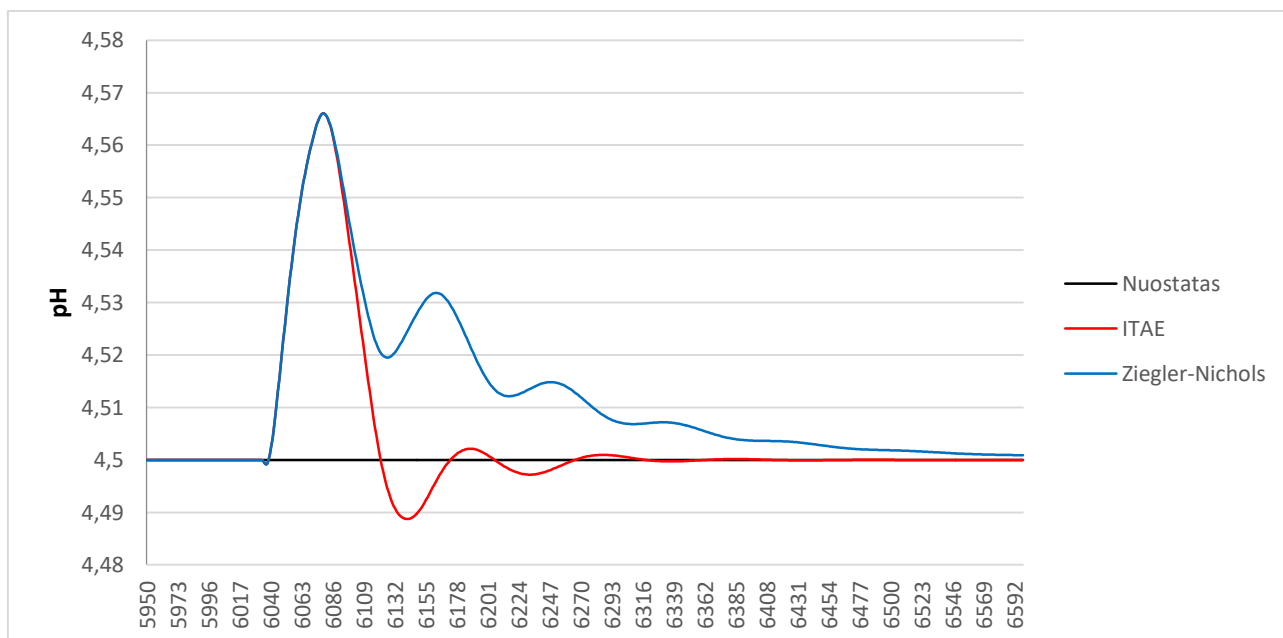
Kintant dujinio amoniako srautui, ARS uždavinys yra pasiekti numatytąją vertę, užtikrinti sistemos stabilumą ir išvengti didesnių svyravimų. Atliekant PID reguliatoriaus derinimą valdymo sistemai buvo keliami tokie papildomi reikalavimai: maksimalus nuokrypis nuo nustatytos pH vertės $\pm 5\%$ ir santykio nusistovėjimo laikas būtų ne ilgesnis kaip 300 sekundžių.

Reguliatoriaus derinimo parametrai koreguoti įvertinus matavimo triukšmą, kuris nuolat veikia modeliuojamą azoto rūgšties srautą. Triukšmo statistiniai parametrai gauti iš srauto matavimo stebėjimo rezultatų.

Siekiant gauti pageidaujama pereinamąjį procesą, ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatyti reguliatoriaus stiprinimo koeficientai koreguojami naudojant „bandymų ir klaidų“ metodą. PID reguliatoriams nustatyti tokie stiprinimo koeficientai:

- ITAE derinimo taisyklėmis $K_r = -18742,268$;
- Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis $K_r = -15280,182$.

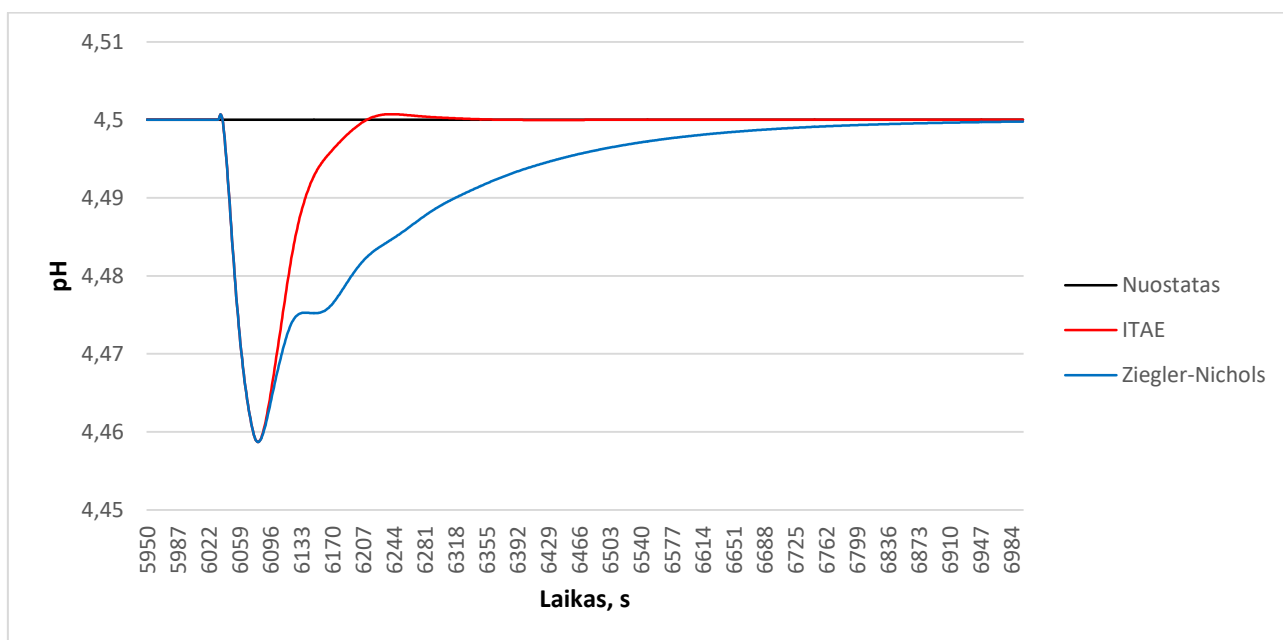
Atlikus reguliatoriaus stiprinimo koeficiento koregavimą integruojančios grandies laiko pastovioji T_i ir diferencijuojančios grandies laiko pastovioji T_d nebuvo keičiamos, jos pateiktos 13-oje lentelėje. Gautos pH reakcijos kreivės, kur ties 6000-ąją modeliavimo sekundę dujinio amoniako srautas šuoliškai pakeistas nuo 5600 kg/h iki 4600 kg/h, pateikiamos 20 pav.



20 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, reguliatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus su koreguotais stiprinimo koeficientais, šuoliškai sumažėjus dujinio amoniako srautui.

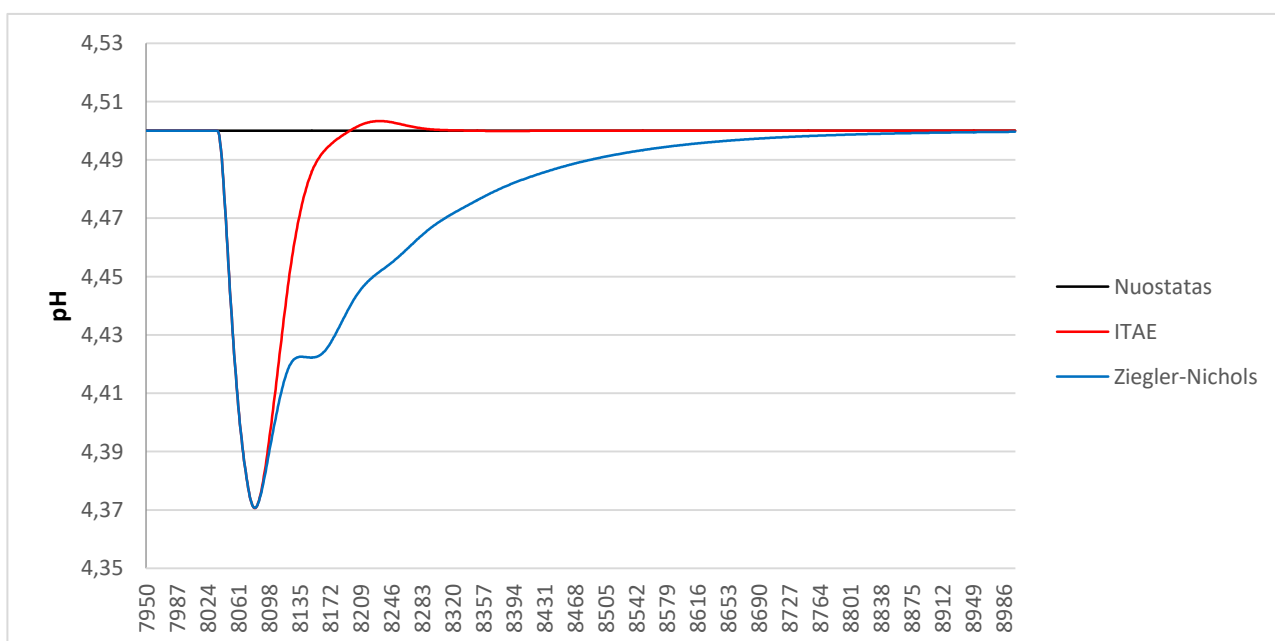
Nepaisant to, kad 20 pav. pateiktose pH reakcijos kreivėse valdymo sistema užtikrina gerą reguliavimo kokybę, nuspręsta valdymo sistemos veikimą išbandyti šuoliškai padidinant dujinio

amoniako srautą. Ties 6000-ąją modeliavimo sekundę dujinio amoniako srautas šuoliškai pakeičiamas nuo 5600 kg/h iki 6600kg/h, gautos pH reakcijos kreivės pateiktos 21 pav.



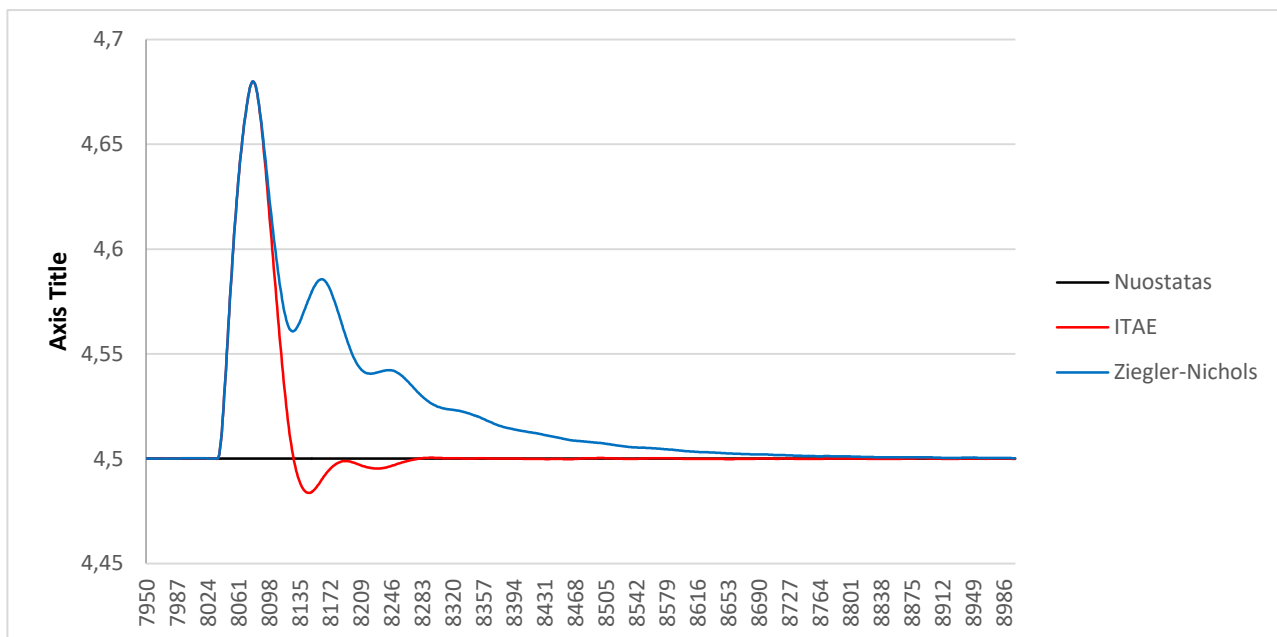
21 pav. ARS reakcija į trikdantįjį poveikį, regulatoriaus derinimui naudojant ITAE ir Ziegler-Nichols derinimo taisyklėmis nustatytus parametrus su koreguotais stiprinimo koeficientais, šuoliškai padidėjus dujinio amoniako srautui.

Papildomai išbandomas valdymo sistemos veikimas, kuomet valdomą objektą veikia santykio trikdys. 8000 – ąją sekundę imituojamas trikdantis santykio poveikis, kurio metu azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h. Dujinio amoniako srauto nuostatas, esant šiam azoto rūgšties pokyčiui, nesikeičia ir yra 5600 kg/h. 22 pav. pateikiamos pH reakcijos kreivės.



22 pav. ARS reakcija pasikeitus nustatytam srautų santykiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h

Analogiškai išbandomas valdymo sistemos veikimas, kuomet 8000 – ają sekundę imituojamas trikdantis santykio poveikis, kurio metu azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h. 23 pav. pateikiamos pH reakcijos kreivės.



23 pav. ARS reakcija pasikeitus nustatytam srautų santykiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h

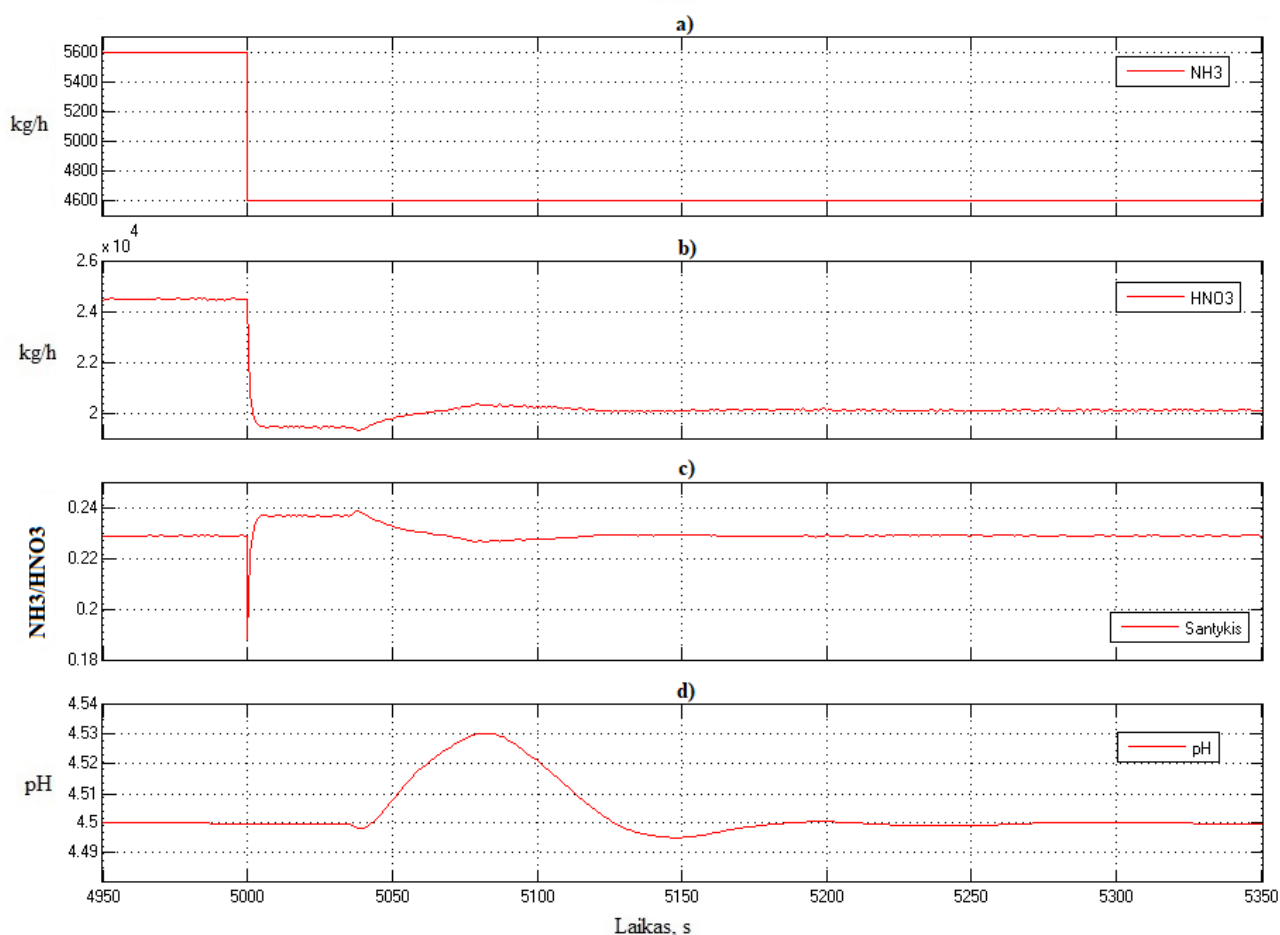
Išanalizavus 20 pav., 21 pav., 22 pav. ir 23 pav. pateiktas reakcijos kreives, ITAE derinimo taisyklėmis suderintas reguliatorius rodo geriausia pirmo priartėjimo reakciją, sutrumpina pakilimo laiką ir reakcija nusistovi greičiau. Todėl nuspręsta valdymo sistemos išorinio kontūro PID reguliatoriaus parametrų nustatymui remtis ITAE derinimo taisyklėmis.

5. Valdymo sistemos modeliavimo rezultatų palyginimas ir analizė

Šiame skyriuje pateikiamas valdymo sistemos modeliavimo metu gautu ARS reakcijos kreivių palyginimas ir analizė. ARS reakcijos kreivių palyginimas atliktas šuoliškai pakeitus dujinio amoniako srautą ir įvedus trikdantįjį santykio pokytį. Reguliatorių derinimas atliktas 4.2 poskyryje, kur reguliatoriaus parametrų nustatymui parinktos ITAE derinimo taisyklės.

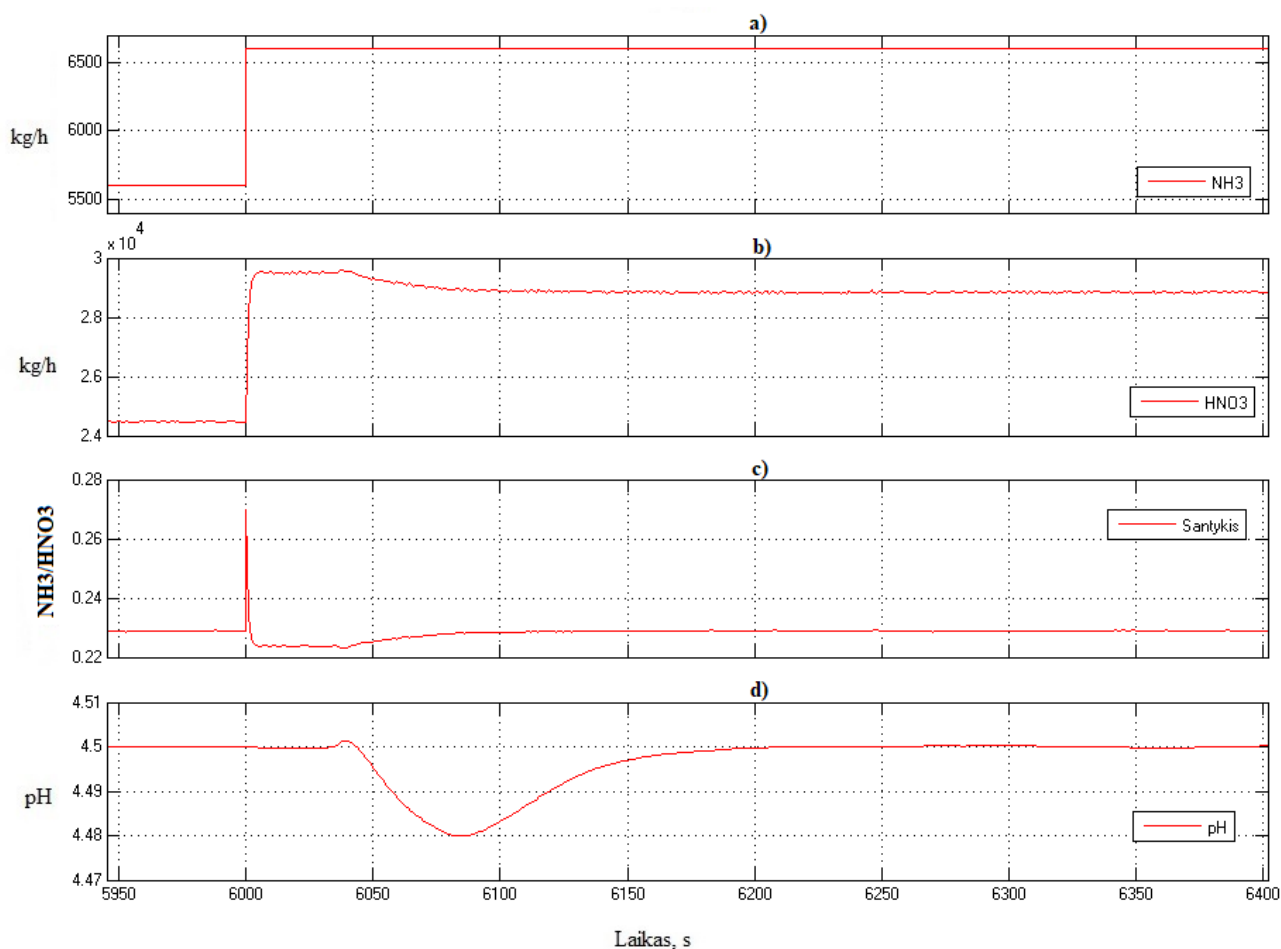
5.1. Valdymo sistemos modeliavimas keičiant dujinio amoniako srautą

Šuoliškai pakeitus dujinio amoniako srautą nuo 5600 kg/h iki 4600kg/h, azoto rūgšties srautas automatiškai pakeičiamas nuo 24472 kg/h iki 19439 kg/h. Pasikeitus srautų santykiui, grįžtamojo ryšio pagalba išoriniame kontūre veikiantis reguliatorius keičia vidinio reguliatoriaus nuostatą, tokių būdų iki 20102 kg/h didinamas azoto rūgšties srautas ir užtikrinamas pageidaujamas srautų santykis bei stabilizuojamas pH. ARS reakcijos kreivės pateiktos 24 pav.



24 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas mažinant dujinio amoniako srautą: a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija

25 pav. pateiktose reakcijos kreivėse stebimas valdymo sistemos veikimas, kuomet šuoliškai pakeitus dujinio amoniako srautą nuo 5600 kg/h iki 6600 kg/h, azoto rūgšties srautas automatiškai pakeičiamas nuo 24472 kg/h iki 29505 kg/h. Tuomet siekiant stabilizuoti pH, išorinio kontūro reguliatorius pakeičia azoto rūgšties srautą iki 28842 kg/h.

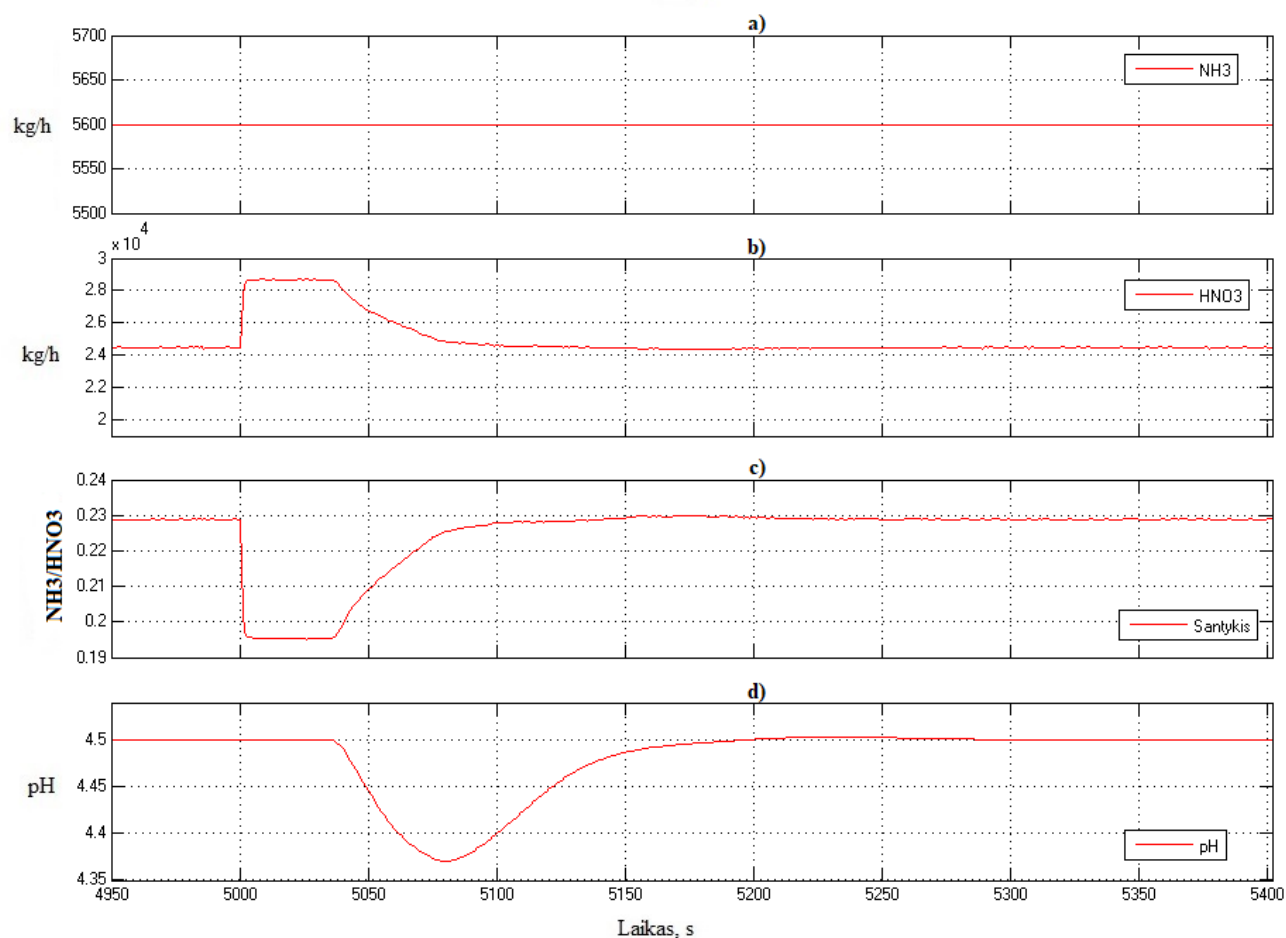


25 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas didinant dujinio amoniako srautą: a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija

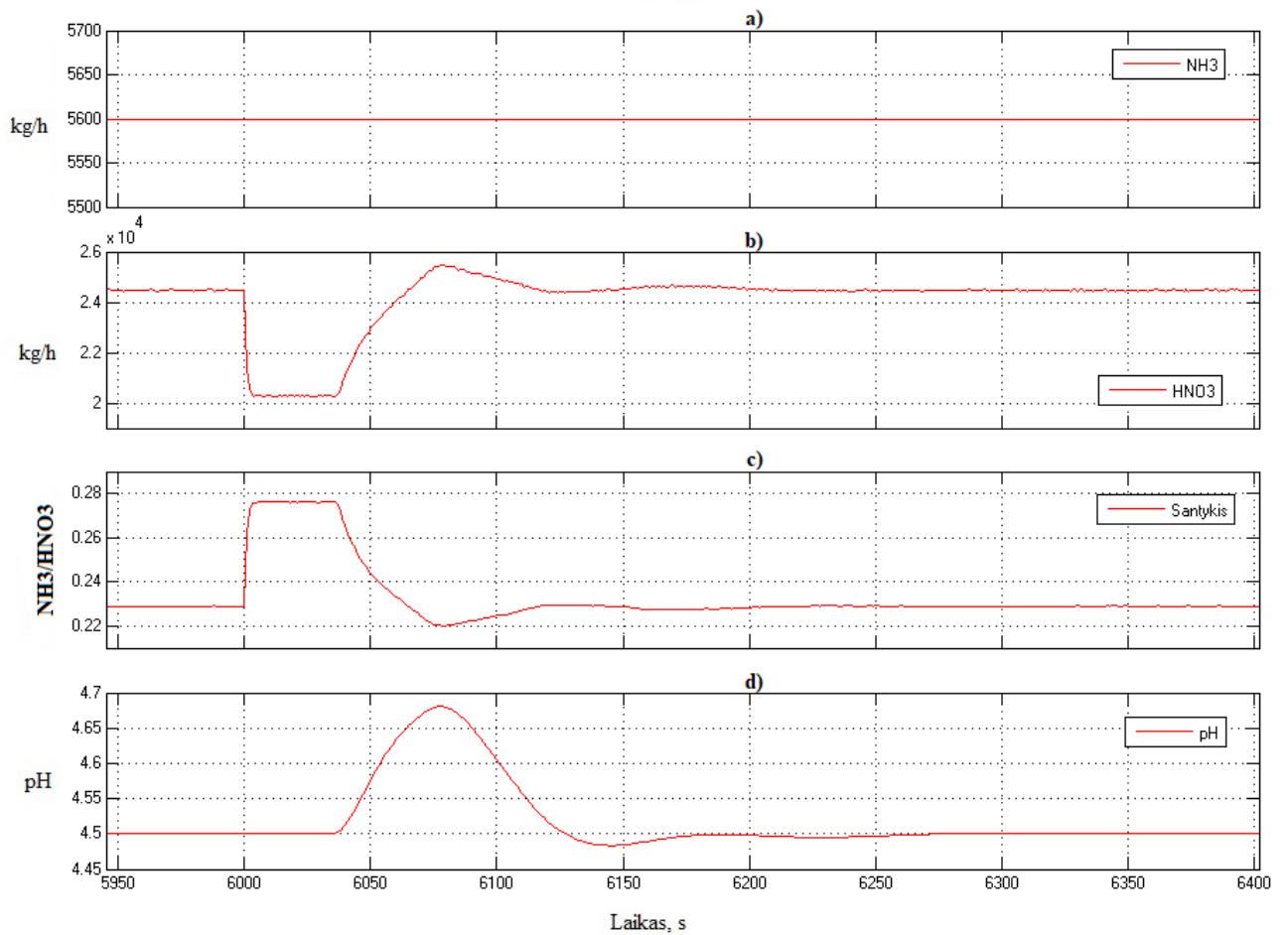
Keičiant dujinio amoniako srautą, pakeičiamas azoto rūgšties srautas ir tokių būdų keičiamas proceso apkrovimas, o valdymo sistema geba išlaikyti pageidaujama srautų santykį ir stabilizuoti pH. Naudojant šią valdymo sistemą, priklausomai nuo gamybinio poreikio, galima ne tik koreguoti gaminamo amonio nitrato kiekį reikalinga KAN gamybai, bet taip pat užtikrinti gaminamo produkto kokybę.

5.2. Valdymo sistemos modeliavimas įvedant trikdį

Papildomai išbandytas valdymo sistemos veikimas, kuomet valdomą objektą veikia santykio trikdys. Šiam trikdžiui veikiant valdymo sistemoje, azoto rūgšties srautas pakeičiamas nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h. Dujinio amoniako srauto nuostatas, esant šiam azoto rūgšties pokyčiui, nesikeičia ir yra 5600 kg/h, šio bandymo ARS reakcijos kreivės pateikiamos 26 pav. Taip pat atliktas bandymas, kuomet sistema veikiama santykio trikdžio, tačiau azoto rūgšties srautas keičiasi nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h, šio bandymo ARS reakcijos kreivės pateikiamos 27 pav. Abiem atvejais išorinis kontūras sėkmingai stabilizuoja pH, keisdamas vidinio kontūro nuostatą.



26 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas, kai procesą veikiant santykio trikdžiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 29481 kg/h : a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija



27 pav. ARS reakcijos kreivių palyginimas, kai procesą veikiant santykio trikdžiui ir azoto rūgšties srautas pasikeičia nuo 24481 kg/h iki 19481 kg/h : a - dujinio amoniako srautas, b - azoto rūgšties srautas, c – srautų santykis, d – pH reakcija

Palyginus ir išanalizavus 26 pav. ir 27 pav. pateiktas reakcijų kreives, matome, kad valdymo sistema dirba patikimai, yra stabili, rodo greitus reakcijos laikus.

Išvados

1. Atlikta proceso analizė ir gauti tyrimo rezultatai parodė, kad valdymo požymių yra sudėtingas objektas, kurio valdymui reikia naudoti sudėtingesnes valdymo sistemas.
2. Atliktas valdymo objekto eksperimentinis tyrimas ir proceso modeliavimui sudaryti perdavimo funkcijų modeliai.
3. Sukurta azoto rūgšties neutralizatoriaus kaskadinio valdymo sistema ir sistemos modelis realizuotas Matlab/Simulink aplinkoje. Kaskadinės valdymo sistemos vidiniame kontūre realizuota azoto rūgšties ir dujinio amoniako srautų santykio reguliavimo sistema, išorinis kontūras stabilizuoja gaminamo produkto (amonio nitrato) pH, koreguojant srautų santykio nuostatą.
4. Atliktas valdymo sistemos reguliatorių derinimas, pirmajame etape naudojant žinomas reguliatorių derinimo taisykles pirmo priartėjimo reguliatorių parametrams nustatyti. Antrajame reguliatorių derinimo etape reguliatorių parametrai koreguojami „bandymų ir klaidų“ metodu.
5. Sukurtos valdymo sistemos imitacinio modeliavimo rezultatai parodė, kad valdymo sistema yra stabili ir užtikrina pakankamą srautų santykio palaikymo tikslumą. Esant ribiniams dujinio amoniako ir azoto rūgšties šuoliniams srauto pokyčiams, srautų santykis atstatomas per 150÷250 sekundžių.
6. Darbo tyrimų rezultatai gali būti panaudoti kuriant srautų santykio reguliavimo sistema. Šio metų srautų santykis palaikomas rankinių būdų.

Literatūros sąrašas

1. LEVIŠAUSKAS, D. *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. ISBN 978-9955-20-280-6
2. SIMUTIS, R. *Sistemų modeliavimas ir identifikavimas*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. ISBN 978-9955-20-255-4
3. AB „Achema“. *KAN gamybos nuolatinis technologinis TR-125-35*. Jonava, 2015 m.
4. *Lecture 8, ammonium nitrate* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2019-05-06]. Prieiga per: <https://nptel.ac.in/courses/103107086/8>
5. LUYBEN, W.L. *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, INC., 1996. ISBN 0-07-100793-8
6. ALTMANN, W. *Practical Process Control for Engineers and Technicians*. IDC Technologies, 2005. ISBN 0-7506-6400-2
7. ASTROM, K.J. and Tore HAGGLUND. *Advanced PID control*. Unated State of America: Lund University, 2006. ISBN 1-55617-942-1
8. SMITH, C.A. *Automated continuous process control*. John Wiley & Sons, INC. 2002. ISBN 0-471-21578-3
9. Marlin T.E. *Process Control, Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. 2nd ed. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2019-05-07]. Prieiga per: <http://pc-textbook.mcmaster.ca/>
10. LIPTAK, B.G. *Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization*. CRS Press, Taylor and Francis Group, LLC. 2005. ISBN 13-978-1-4200-6400-1
11. ZIEGLER, J.G. and Nathaniel B. NICHOLS. *Optimum Settings for Automatic Controllers*. ASME. Rochester, New York. 1942.
12. SUNG S.W., Jietae LEE and In-Beum LEE. *Process identification and PID control*. John Wiley & Sons, INC (Asia) .Singapore. 2009. ISBN 978-0-470-82410-8
13. SMITH C.A., Armando B. CORRIPIO. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2nd ed. John Wiley & Sons, INC. 1997. ISBN 0-471-57588-7
14. COHEN G.H. and COON G. A. *Theoretical Consideration of Retarded Control*. Journal: Trans. ASME, vol.75. 1953.
15. RIVERA D.E., Manfred MORARI and Sigurd SKOGESTAD. *Internal Model Control. 4. PID Controller Design*. Industrial Engineering and Chemical Process Design and Development. 1986. DOI: 10.1021/i200032a041
16. JOHNSON M.A. and Mohammad H. MORADI. *PID control - New Identification and Design Methods*. Springer-Verlag, GmbH. 2005. ISBN 1-85233-702-8
17. ОЛЕВСКИЙ, В.М. *Технология аммиачной селитры [Amonio nitrato gamybos technologija]*. Москва: ХИМИЯ. 1978.
18. SEARCH W.J. and REZNIK R.B. „Source assessment: ammonium nitrate production“, Monsanto Research Corporation. Unated State of America, Ohio. 1977.
19. *The Theory of pH Measurement, application data sheet* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2019.05.10]. Prieigą per: <https://www.emerson.com/documents/automation/application-data-sheet-theory-of-ph-measurement-rosemount-en-68432.pdf>
20. KAŽYS R. *Neelektrinių dydžių matavimas*. Kaunas. Vitae Litera, UAB. 2007. ISBN 978-9955-686-44-6

Priedai

1 priedas. MATLAB aplinkoje parašytas tekstas skirtas perdavimo funkcijų parametru nustatymui naudojant chemotaksinės paieškos algoritmą ir eksperimentinius duomenys

```
%Duomenys iš šuolinės reakcijos eksperimento
ye=[0 0;10 0;20 0;30 0;40 0.204;50 1.4246;60 2.7619;70 3.3761;80 3.6444;90
3.7785;100 3.8635;110 3.9231;120 3.9666;130 4.01;140 4.0441;150 4.0655;160
4.109;170 4.13;180 4.1501 ];
%Pradiniai sprendinio parametrai antros eilės perdavimo funkcijai su vėlavimu
K=4.37;T=40;Tau=10;
%Perdavimo funkcijos sprendinys su pradiniais parametrais
%Kritinio slopinimo reakcija
y=[];y(:,1)=ye(:,1);
y(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ye(:,1)-Tau)/T)).*exp(-((ye(:,1)-Tau)/T))));
for i=1:18
if y(i,1)<Tau
y(i,2)=0;
end
end
%Nuokrypiu kvadratu sumos minimizavimas
S=sum((ye(:,2)-y(:,2)).^2);
%Perdavimo funkcijos sprendinio parametru modifikavimas
miu=0; std=1;
DT=1;DTau=1;
T2=T-(DT*randn);Tau2=Tau-(DTau*randn);
%Modifikuotas sprendinys
Y2=[];y1(:,1)=ye(:,1);
Y2(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ye(:,1)-Tau2)/T2)).*exp(-((ye(:,1)-Tau2)/T2))));
for i=1:18
if y2(i,1)<Tau2
y2(i,2)=0;
end
end
%pradinio ir modifikuoto sprendiniu nuokrypiu kvadratu suma
S=sum((ye(:,2)-y2(:,2)).^2);
%Perdavimo funkcijos parametru paieška
for i=1:180
SS(i)=S; SSS(i)=S0;
if S0<S
T2=T-(DT*randn);Tau2=Tau-(DTau*randn);
y=[];y(:,1)=ye(:,1);y(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ye(:,1)-Tau)/T)).*exp(-((ye(:,1)-
Tau)/T))));
for i=1:18
if y(i,1)<Tau
y(i,2)=0;
end
end
y2=[];y2(:,1)=ye(:,1);y2(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ye(:,1)-Tau2)/T2)).*exp(-
((ye(:,1)-Tau2)/T2))));
for i=1:18
if y2(i,1)<Tau2
y2(i,2)=0;
end
end
S=sum((ye(:,2)-y1(:,2)).^2);
else
S0=S; y=y1;T=T2;Tau=Tau2;T2=T-(DT*randn);
Tau2=Tau-(DTau*randn);y2=[]; y2(:,1)=ye(:,1);
Y2(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ye(:,1)-Tau2)/T2)).*exp(-((ye(:,1)-Tau2)/T2))));
for i=1:18
if y1(i,1)<Tau2
y2(i,2)=0;
end
end
end
```

```

end
end
S=sum((ye(:,2)-y2(:,2)).^2);
end
end
%Rezultatai
figure()
plot(SSS,'*')
ym=[];ym(:,1)=0:1:180;
ym(:,2)=(K*0.95)*(1-(1+((ym(:,1)-Tau)/T)).*exp(-((ym(:,1)-Tau)/T)));
for i=1:181
if ym(i,1)<Tau
ym(i,2)=0;
end
end
%Eksperimentinių ir modeliavimo duomenų palyginimas
figure()
plot(ye(:,1),ye(:,2),'*',ym(:,1),ym(:,2))
ylabel('pH')
xlabel('Laikas (s)')
legend('Eksperimento duomenys','Modeliavimo duomenys')

```

2 priedas. Matlab/Simulink aplinkoje realizuotas valdymo sistemos modelis

