



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Mindaugas Bukauskas

Projekto autorius

Prof. Habil. Dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Mindaugas Bukauskas

Projekto autorius

Prof. Habil. Dr. Donatas Levišauskas

Vadovas

Doc. dr. Andrius Knyš

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mindaugas Bukauskas

Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mindaugo Bukausko, baigiamasis projektas tema „Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų 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)

Bukauskas, Mindaugas. Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. Habil. Dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: atvirkščioji reakcija, valdymo sistema, dinamika.

Kaunas, 2019. 52 p.

Santrauka

Darbe pateikta informacija apie atvirkščiosios reakcijos valdymo sistemas. Detaliau apžvelgti keli pavyzdžiai, kur šios reakcijos egzistuoja bei kaip jos yra valdomos. *Matlab/Simulink* aplinkoje sukurti imitaciniai valdymo sistemų modeliai atvirkščiosios reakcijos tyrimui: valdymo sistema su grįžtamuju ryšiu, bei valdymo sistema su atvirkščiosios reakcijos kompensatoriumi. Šioms valdymo sistemoms reguliuoti, išbandytos 4 reguliavimo taisyklės. Siekiant adekvačiai įvertinti - valdymo sistemos palygintos atsižvelgiant į kokybės rodiklius, tų pačių reguliavimo taisyklių gautais parametrais. Pateiktos išvados bei rekomendacijos.

Bukauskas, Mindaugas. Investigation of Control Systems of Processes with Inverse Response. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Habil. Dr. Donatas Levišauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: inverse response, control system, dynamics.

Kaunas, 2019. 52 p.

Summary

This work contains information on inverse response systems, otherwise known as non-minimal phase systems. A couple of examples of where and how these systems are used in practice are described, as well as how they are controlled. For the purposes of investigation a couple of inverse response system models have been developed with the help of the *Matlab/Simulink* environment, namely – feedback control system and a control system with a inverse response compensator. A total of 4 regulatory rules were tested on the developed control systems. They have been adequately evaluated based on the quality indicators, that the systems themselves generated, when using the aforementioned regulatory rules. Relevant findings and recommendations are provided.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	10
1. Neįprasta procesų dinamika	11
1.1. Įprastinės dinamikos procesai.....	11
1.2. Sudėtingos dinamikos procesai.....	12
1.2.1. Procesai su dideliu vėlavimu	12
1.2.2. Atviroje sistemoje nestabilūs procesai	12
1.2.3. Atvirkščiosios reakcijos procesai.....	13
1.3. Atvirkščiosios reakcijos procesų pavyzdžiai.....	14
1.3.1. Atvirkščioji reakcija katilo būgne	14
1.3.2. Srautinis reaktorius.....	15
1.3.3. <i>Van de Vusse</i> reaktorius.....	16
1.4. Atvirkščiosios reakcijos valdymo sistemų tipai.....	17
1.4.1. Valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu	17
1.4.2. Atvirkščiosios reakcijos kompensavimo valdymo sistema	17
1.4.3. Adaptyvioji valdymo sistema	18
1.4.4. Valdymo sistema su neuroniniais tinklais	18
1.4.5. Hibridinės sistemos	19
1.5. Darbe tiriamų valdymo sistemų modifikacijų aktualumas	19
2. <i>Van de Vusse</i> reaktoriaus imitacinis modelis	20
2.1. Valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu	20
2.1.1. Proceso imitacinio modelio kūrimas <i>Matlab/Simulink</i> aplinkoje	20
2.1.2. <i>Van de Vusse</i> reaktoriaus modelio sudarymas pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu mažiausių kvadratų metodu.....	22
2.1.3. Reguliavimo kontūro derinimas.....	25
2.1.4. Reguliavimo dėsniai	25
2.2. Kompensavimo valdymo sistema	33
3. Valdymo sistemų palyginimas	46
Išvados ir rezultatai	51
Literatūros sąrašas	52

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė Nominalios sąlygos reaktoriuje.....	21
2.2 lentelė Identifikuoto modelio parametrai pirmosios eilės perdavimo funkcija su vėlavimu	23
2.3 lentelė Cohen ir Coon regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	26
2.4 lentelė Ziegler ir Nichols regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	27
2.5 lentelė IMC regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	30
2.6 lentelė ITAE nuostatui regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai	31
2.7 lentelė ITAE kompensuoti trikdžiui regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	32
2.8 lentelė perdavimo funkcijos vertės Smith'o metodu	37
2.9 lentelė Cohen ir Coon regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	39
2.10 lentelė Ziegler ir Nichols regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	40
2.11 lentelė IMC regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai	42
2.12 lentelė ITAE nuostato regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	43
2.13 lentelė ITAE trikdžio regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai.....	44

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Įprastinio proceso reakcijos kreivė, sistemos įėjimą paveikus šuoliškai	11
1.2 pav. Sudėtingos dinamikos procesų išėjimo dydžio reakcijos kreivės. a – procesai, su dideliu vėlavimu, b – atvirkščiosios reakcijos procesai, c – atvirosios sistemos procesai pasižymintys nestabilumu. [5]	12
1.3 pav. Atvirkščiosios reakcijos procesų struktūra, išskaidžius perdavimo funkcijomis	13
1.4 pav. Atvirkščiosios reakcijos proceso išėjimo dydžio kitimo kreivė	13
1.5 pav. Katilo būgno principinė valdymo schema	15
1.6 pav. Vandens lygio katile kitimo grafikas	15
1.7 pav. Srautinio reaktoriaus schema	15
1.8 pav. <i>Van de Vusse</i> reaktorius	16
1.9 pav. Valdymo sistemos su grįžtamuju ryšiu struktūrinė schema	17
1.10 pav. Valdymo sistema su atvirkščios reakcijos kompensatoriumi	18
2.1 pav. <i>Van de Vusse</i> reaktoriaus schema	20
2.2 pav. <i>Van de Vusse</i> reaktoriaus imitacinis modelis	20
2.3 pav. Diferencialinių lygčių bloko struktūra	21
2.4 pav. Skiedimo spartos šuolinės reakcijos grafikas	22
2.5 pav. C_B koncentracijos kitimo reakcijos kreivė	22
2.6 pav. <i>Matlab/Simulink</i> imitacinis modelis komponento B koncentracijos kitimo duomenų apksimavimui	24
2.7 pav. Aproximuojančio modelio palyginimas su koncentracijos kitimo eksperimentiniais duomenimis	24
2.8 pav. Valdymo sistemos modelis <i>Matlab/Simulink</i> aplinkoje	25
2.9 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis	26
2.10 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis	27
2.11 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis	28
2.12 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis	29
2.13 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis	30
2.14 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis	31
2.15 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių ITAE nuostatui skirtomis derinimo taisyklėmis	32
2.16 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių ITAE trikdžiui skirtomis derinimo taisyklėmis	33
2.17 pav. Reakcijos kreivės palyginimas su identifikuota perdavimo funkcija	34
2.18 pav. Kompensavimo valdymo sistemos struktūrinė schema	35
2.19 pav. Reakcijos kreivė, kai kompensavimo kontūre $\lambda = 2Tn$	36
2.20 pav. Reakcijos kreivė, kai kompensavimo kontūre $\lambda = 3Tn$	36

2.21 pav. Imitacinis modelis skirtas palyginti reakcijos kreivę su Smith'o metodu gautais perdavimo funkcijos parametrais	37
2.22 pav. Reakcijos kreivės palyginimas su Smith'o metodu gautais perdavimo funkcijos parametrais	38
2.23 pav. Kompensavimo valdymo sistemos imitacinis modelis	38
2.24 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis.....	39
2.25 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis	40
2.26 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis.....	41
2.27 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis.....	41
2.28 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis.....	42
2.29 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis.....	43
2.30 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių ITAE nuostatomis skirtomis derinimo taisyklėmis.....	44
2.31 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių ITAE trikdžio taisyklėmis.....	45
3.1 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis	46
3.2 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis.....	46
3.3 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą, Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis.....	47
3.4 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį, Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis.....	47
3.5 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą, IMC derinimo taisyklėmis.....	48
3.6 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį, IMC derinimo taisyklėmis.....	48
3.7 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą ITAE nuostato derinimo taisyklėmis	49
3.8 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį ITAE trikdžio derinimo taisyklėmis.....	49

Išvadas

Visos sistemos turi įėjimo ir išėjimo kintamuosius. Sistemos reakcija yra aprašoma išėjimo kintamojo priklausomybe nuo įėjimo kintamojo. Tokios priklausomybės tarp vieno ar kelių kintamųjų paprastai aprašomos matematinėmis lygtimis, kurios yra pagrįstos fizikiniais dėsniais arba gaunamos eksperimentiškai. Sistema apima įvairius komponentus, valdymo algoritmus, įrenginius ir prietaisus, kurie sąveikauja tarpusavyje. Ji gali turėti bet kokį skaičių įėjimų ir išėjimų. [1]

Valdymo sistemos esmė yra stebėti kintamuosius, rasti sprendimus, kaip efektyviai reguliuoti įėjimo dydžius, kad būtų galima gauti pageidaujamą išėjimą. Projektuojant valdymo sistemas susiduriama su sudėtingos dinamikos procesais, kurie, paveikus juos valdančiam poveikiui, pradiniu momentu demonstruoja priešingos krypties valdomojo kintamojo nuokrypą, lyginant su ilgesnio poveikio kryptimi. [1] Kai pirminis dinaminės sistemos atsakas yra priešingas galutiniam rezultatui, jis vadinamas atvirkščia reakcija. Atvirkštinė reakcija paprastai įvyksta tada, kai tuo pačiu metu atsiranda du atskiri efektai, tačiau jie yra skirtingos krypties ir dinamikos. Taigi sistema yra lygiagrečiai sujungta su dviem perdavimo funkcijomis, todėl atskirus išėjimus galima sudėti norint gauti bendrą reakciją. [5] Tokių procesų pavyzdžiu yra vandens lygio valdymo procesas garo katilo būgne, kai kurie cheminės technologijos procesai ir kiti procesai, kurių įėjimą paveikus dydžiu, išėjimo reakcija pradžioje gaunama atvirkštinė norimai. [13]

Susidūrus su valdomu procesu, atvirkščiąjį procesą iš kitų atskirti galima, jeigu jo dinamika būdinga:

1. judėjimas prasideda priešinga nuostatai kryptimi;
2. vėliau judėjimas apsisuka pageidaujama kryptimi;

Pagrindinis tyrimo tikslas – susipažinti su atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemų projektavimu, sudaryti ir imitacinio modeliavimo būdu iširti konkretaus valdomo objekto (*Van de Vusse* reaktoriaus) alternatyvias valdymo sistemas.

Šio darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti atvirkščiosios reakcijos procesų valdymą;
2. suvokti temos problematiką;
3. iširti vieną valdomą objektą, kaip atvirkščiosios reakcijos proceso pavyzdį;
4. iširti dvi valdymo sistemas tam pačiam procesui;
5. sugeneruoti skirtingus imitacinius valdymo sistemos modelius tam pačiam procesui;
6. taikant reguliavimo dėsnų formules, sureguliuoti reguliatorius ir gauti objekto išėjimo grafikus;
7. apskaičiuoti abiejų modelių gautų išėjimo dydžių kokybės rodiklius;
8. palyginti kokybės rodiklius, pateikti išvadas ir rekomendacijas.

1. Neįprasta procesų dinamika

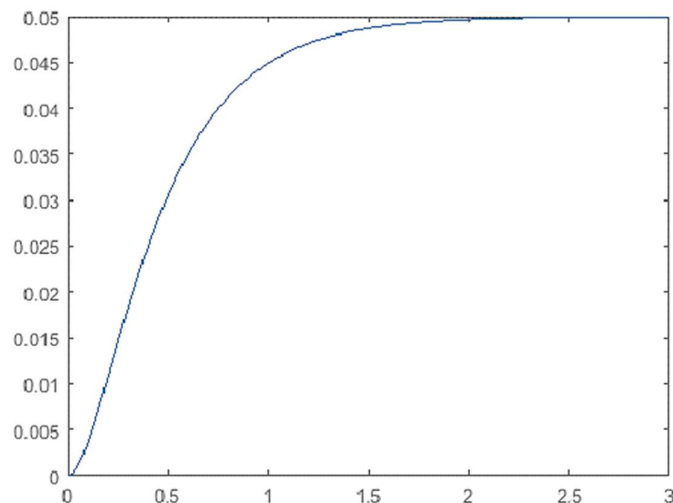
Kai kurių procesų ypatumai ir savybės tiek skiriasi nuo įprastų procesų, jog norint juos kokybiškai valdyti, turi būti naudojami specifiniai valdymo metodai ir sistemos. Į šį sąrašą patenka didelio vėlinimo procesai, priešingos, arba kitaip atvirkščiosios, reakcijos procesai ir nestabilūs atviroje sistemoje procesai. Tai pat, iš dalies prie jų priskiriami ir procesai, neturintys savybės išsilyginti, arba kitaip integruojantieji procesai. [5] Bendras požymis, kurį turi šie procesai savo perdavimo funkcijose, tai neminimalios fazės elementai:

- procesuose su dideliu laiko vėlavimu – eksponentės elementas;
- atvirkščiosios reakcijos procesuose – teigiamas nulis;
- nestabiliuose integruojančiuosiuose procesuose – teigiamas poliūs.

Šiuose procesuose sutinkamas išsiskiriantis fazės kitimas, lyginant su įprastu procesu, todėl juos dar galima išgirsti vadinant neminimalios fazės sistemomis. Šios sistemos sukelia didelių valdymo problemų, kurios atsiranda dėl neminimalios fazės sistemų dinaminį savybių. [2,5]

1.1. Įprastinės dinamikos procesai

Norint aptarti sunkias dinamines savybes turinčius procesus, pirmiausia reikia aptarti, kokios savybės priklauso įprastiems procesams. Tai procesai, kurių išėjimo parametro kitimo reakcija, įėjimo parametą pakeitus šuoliškai, gaunama panaši į pavaizduotą 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Įprastinio proceso reakcijos kreivė, sistemos įėjimą paveikus šuoliškai

Įprastinio proceso išėjimo dydžio reakcijos kreivei būdinga:

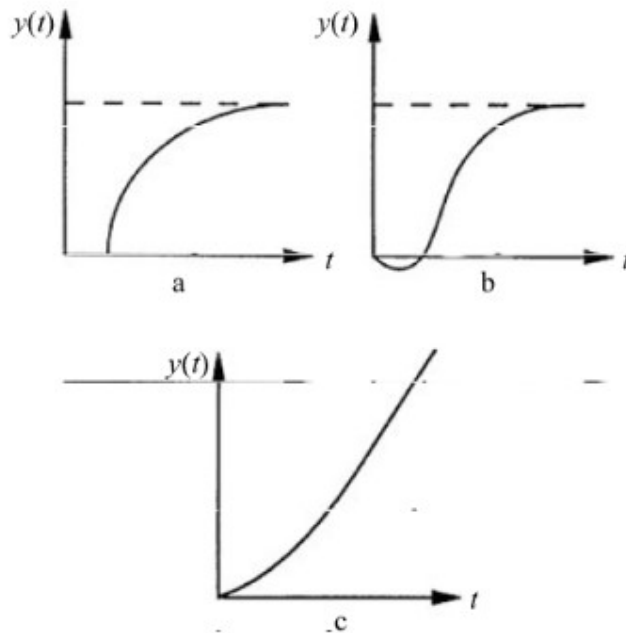
- nebūna santykinai didelio vėlavimo, reakcija įvyksta praktiškai iškart;
- jei įėjimo dydžio šuolinis poveikis, atsižvelgiant į fizikinius ir cheminius dėsnius, turi veikti išėjimo dydį kažkuria tai linkme, galima sakyti, nauja stabilia verte, tai reakcijos kreivė ir būna nukreipta link tos vertės, o ne atvirkščiai;

- įėjimo dydį paveikus šuoliškai, praėjus atitinkamam laiko periodui, išėjimo dydis nusistovi ties nauja stabilia verte.

Valdyti įprastinius procesus taikomos tradicinės valdymo sistemos, pvz.: vienkontūrės grįžtamojo ryšio valdymo sistemos, pakopinės valdymo sistemos ir kitos. [1,3,5]

1.2. Sudėtingos dinamikos procesai

Išėjimo dydžio reakcijos, kuriose sutinkama sudėtinga proceso dinamika, parodytos 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Sudėtingos dinamikos procesų išėjimo dydžio reakcijos kreivės. a – procesai, su dideliu vėlavimu, b – atvirkščiosios reakcijos procesai, c – atvirosios sistemos procesai pasižymintys nestabilumu. [5]

1.2.1. Procesai su dideliu vėlavimu

Procesai, kurių išėjimo dydžio reakcijai būdingas didelis vėlavimas, yra stebimi nuo pat pradžių, kada įėjimo dydis paveikiamas šuoliškai, o ne nuo tada, kai proceso reakcija tampa nukreipta nuostato link. Šioje reakcijoje, aukšto stiprinimo reguliavimo kontūruose veikiamų valdančiųjų poveikių, išėjimo dydžiai gali būti per stipriai kompensuojami, kas sistemą gali paversti visiškai nestabilia. [1]

Kad to būtų išvengta, reguliuojant didelio vėlavimo procesų reguliavimo kontūrą, turi būti ribojama stiprinimo vertė. Taip pat, procesų su dideliu vėlavimu valdymui PID reguliavimo dėsnis nėra geras pasirinkimas, lyginant su PI reguliavimo dėsniu. Todėl, kad diferencialinė dedamoji, dėl nekokybiško prognozavimo tampa nenaudinga. [5]

1.2.2. Atviroje sistemoje nestabilūs procesai

Nestabilūs procesai atviroje sistemoje, kitaip dar atpažįstami, kaip turintys teigiamą polių perdavimo funkcijoje, pasižymi tuo, jog išėjimo dydis neapibrėžiamai auga nevaldomoje sistemoje. Tai reiškia, jog daug žinomų klasikinių reguliavimo procedūrų šiems procesams netinka. Šių procesų neapibrėžtumui turėti įtakos gali įvairios priežastys, o PI ar PID reguliavimo dėsniai gali nekokybiškai juos stabilizuoti. Kadangi dauguma reguliavimo dėsnio pritaikymo metodų remiasi tuo, kaip tiksliai

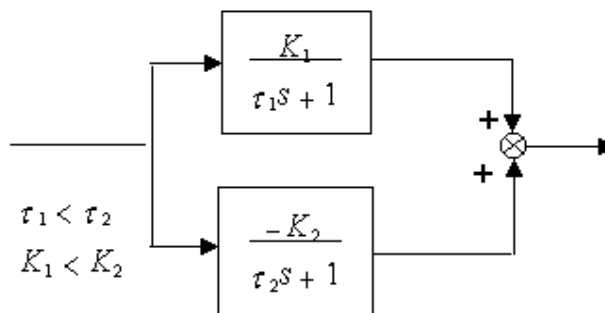
procesas yra identifikuotas perdavimo funkcija su vėlavimu, tai daugiausia sunkumų tokių sistemų derinime išskyla identifikuojant proceso modelį, kuris nenusistovi ties viena stabilia būsena. [5]

Vienas iš šių reakcijos pavyzdžių yra izoterminis nepertraukiamo veikinimo cheminis reaktorius. [4,7]

1.2.3. Atvirkščiosios reakcijos procesai

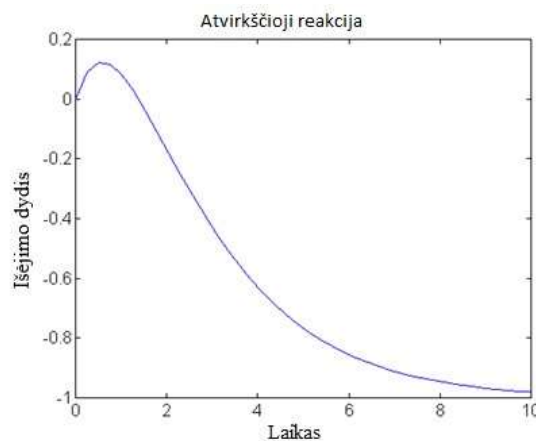
Valdymo sistemos įėjimą pakeitus šuoliškai, kai pradinis sistemos dinamikos atsakas yra priešingas galutiniam rezultatui, tai vadinama *atvirkštine reakcija*. [2,12]

Atvirkštinis atsakas paprastai atsiranda, kai tuo pačiu metu veikia du atskiri efektai, tačiau skirtingos krypties ir dinamikos. Taigi sistema yra lygiagrečiai sujungta su dviem perdavimo funkcijomis, todėl, teoriškai, atskirus išėjimus galima pridėti, siekiant gauti bendrą atsaką. [6,13]



1.3 pav. Atvirkščiosios reakcijos procesų struktūra, išskaidžius perdavimo funkcijomis

Siekiant geriau suprasti atvirkštinės reakcijos procesus, galima vadovautis 1.3 pav. parodyta bloku diagrama, kur dvi pirmos eilės perdavimo funkcijos yra prijungtos lygiagrečiai. Atsižvelgiant į perdavimo funkcijas ir jų parametrų sąlygas, kai pirmojo proceso laiko pastovioji yra mažesnė už antrojo, bei pirmojo proceso stiprinimo vertė yra mažesnė už antrojo, gaunama reakcijos kreivė parodyta 1.4 pav.



1.4 pav. Atvirkščiosios reakcijos proceso išėjimo dydžio kitimo kreivė

Kadangi pirmasis procesas yra greitesnis, jis dominuoja pradiniame atsake, tačiau kadangi 2 procesas turi didesnę stiprinimą (dėl didesnio pastovaus būsenos padidėjimo), jis dominuoja pastovios būsenos reakcijoje.

Procesai, kuriuose vyksta atvirkštinė reakcija, gali lengvai sukelti kontūro stabilumo problemas. Išvestinės kontrolės naudojimas yra abejotinas dėl stabilumo perspektyvos ir, žinoma, nėra naudingas. Norint gauti stabilų valdomą procesą reikia atkreipti dėmesį į:

- negalima naudoti aukšto regulatoriaus stiprinimo, nes jis "persekioja" atvirkščiai reaguojantį procesą ir gadina išėjimo signalą;
- kai, procesas yra integruojamas, taip pat reikia naudoti ilgą integravimo laiką (mažą integralųjį stiprinimą);
- taip yra gaunamas lėtai reaguojantis valdymo ciklas, o bet koks bandymas jį paspartinti žymiai sumažins stabilumą.

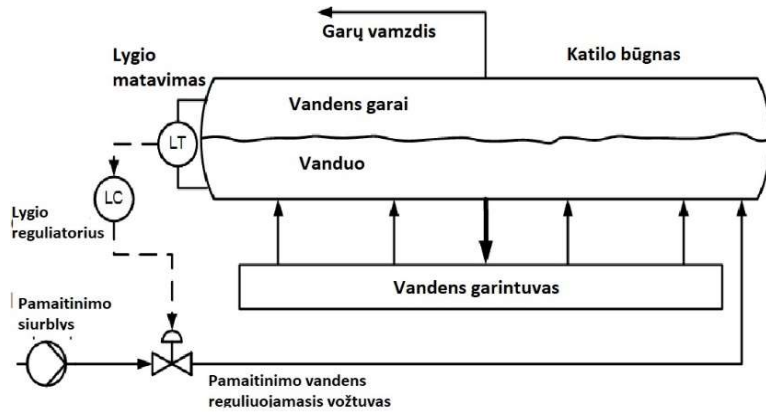
1.3. Atvirkščiosios reakcijos procesų pavyzdžiai

Galima įsivaizduoti situaciją: Kai nuspaudžiamas automobilio akseleratorius, tikimasi, kad automobilis paspartės. Tačiau, įvyksta atvirkščiai – jis lėtėja. Arba dar blogiau: pakeliama koja nuo akseleratoriaus ir automobilis paspartėja. Kuo daugiau pakeliama koja, tuo daugiau automobilis paspartėja. Tai, atrodytų neįmanoma ir protu nesuvokiama, tačiau kasdien šios reakcijos įvyksta tūkstančiuose katilų ir kai kurių kitų procesų visame pasaulyje. Šis reiškinys vadinamas atvirkščiąja reakcija. Vienas iš dažniausiai pasitaikančių atvirkštinės reakcijos atvejų yra katilo būgno lygio kontrolė. [12]

1.3.1. Atvirkščioji reakcija katilo būgne

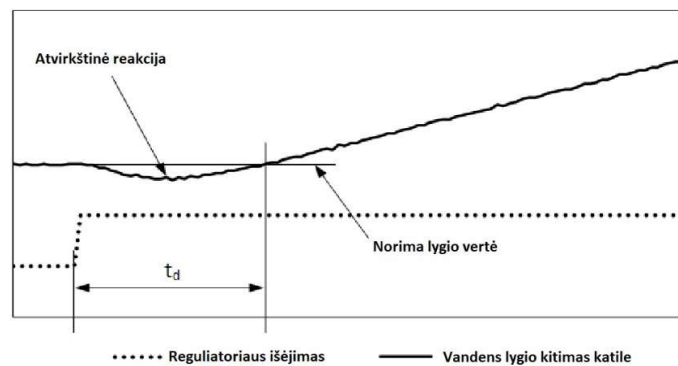
Katile vanduo paverčiamas garais. Garas ir vanduo atsiskiria katilo būgne, o garai išeina pro vamzdį būgno viršuje. Svarbu atskirti vandens lygį būgne nuo šio vamzdžio arba vanduo išeis su garais ir sugadins garams naudojamą įrangą. Dar svarbiau yra tai, kad katile visuomet būtų šiek tiek vandens - jei katilo vidus išdžius, nebeliks vandens, kuris jį vėsintų, o tai gali labai pakenkti katilui. Taigi vandens lygis būgne paprastai palaikomas arti jo vidurio linijos.

Būgne esančio vandens lygis kontroliuojamas, įpilant vandens į katilą, vadinamą maitinamu vandeniu. Uždaro ciklo regulatorius stebi būgno lygį ir, jei jis yra žemesnis nei nustatytasis, jis atidaro tiekimo vandens valdymo vožtuvą, kad padidėtų tiekimo vandens srautas ir atvirkščiai (1.5 pav.). Tuomet atsiranda atvirkštinės reakcijos efektas. [13]



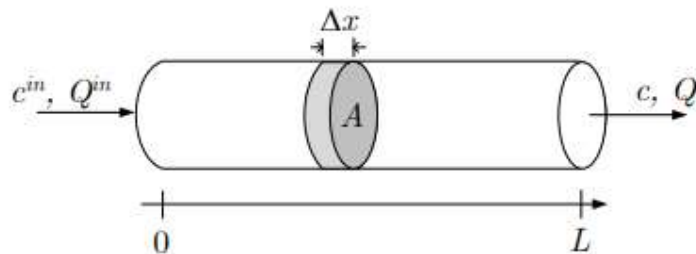
1.5 pav. Katilo būgno principinė valdymo schema

Į katilo būgną patenkančio maitinimo vandens temperatūra paprastai yra žemesnė nei virimo. Kai į šildymo katilą patenka daugiau šaltesnio vandens, šiek tiek vandens garų burbuliukų susikondensuoja. Dėl to būgno lygis sumažėja, tuomet vyksta atvirkštinė reakcija. Tačiau poveikis yra tik laikinas. Po kurio laiko didesnis pamaitinimo srauto greitis viršija prarastą tūrį ir vanduo būgne vėl pakyla (1.6 pav.). Ta pati reakcija vyksta ir atvirkščiai: kai sumažėja šaltesnio pamaitinimo vandens srautas, garo išsiskiria daugiau, o papildomas garo kiekis padidina būgno lygį. Bet po kurio laiko, kaip tikėtasi, būgno lygis pradeda mažėti.



1.6 pav. Vandens lygio katile kitimo grafikas

1.3.2. Srautinis reaktorius



1.7 pav. Srautinio reaktoriaus schema

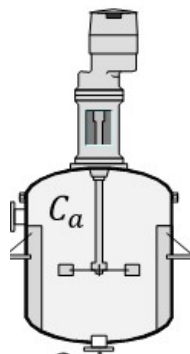
Tai vamzdinis reaktorius. Jį sudaro ilgas cilindrinis vamzdis, per kurį reakcijos mišinys teka pastoviai. Paprastai, temperatūra, slėgis ir koncentracija nesikeičia vamzdyje, sukuriant „kamštį“, tekantį per reaktorių. Kai reagentai praeina per srautinį reaktorių (angl. *plug flow reactor*), jie sunaudojami, sukuriant pastovios koncentracijos produktą išilgai visame vamzdyje.

Tačiau siekiant išgauti reikiamos koncentracijos junginių reaktoriuje, dažnai sutinkamos atvirkštinės reakcijos dėl reagentų temperatūros ar koncentracijos skirtumų. Tai gali lemti labai stambias problemas prijungus šį reaktorių prie kitos sistemos, pvz., trąšų kristalų gaminimo, kur reikalinga ypatingai tiksli reagento koncentracija ir temperatūra.

1.3.3. *Van de Vusse* reaktorius

Atvirkštinės reakcijos tyrimui naudojamas 1.8 pateiktame paveikslėlyje parodytas *Van de Vusse* nepertraukiamai maišomas reaktorius (angl. *continuously stirred tank reactor*), kuris reaguoja į reaktyviosios sistemos, naudojamos ciklopentenolio (atstovaujamos B), gauto iš ciklopentadieno (atstovaujamos A), sintezei. Šiame reaktoriuje vyksta serijinės ir lygiagrečios reakcijos tarp sistemos įėjimo (reakcija A) ir gauto produkto (reakcija B).

Tačiau, atsižvelgiant į stiprų reagentų ir produktų reaktyvumą, gaunami du papildomi nepageidaujami produktai. Dciklopentadienas (D) susidaro iš Diels-Alder reakcijos, o ciklopentendiolis (C) yra gaunamas kaip vienas po kito gautas produktas, pridant dar vieną vandenilio molekulę.



1.8 pav. *Van de Vusse* reaktorius



Reagentų virsmams apibrėžtos masių balanso lygtys:

Komponentas	Balanso lygtis
A	$\frac{d(C_A)}{dt} = -k_1 C_A - k_3 C_A^2 + D(C_{Af} - C_A)$ (1.2)

B	$\frac{d(C_B)}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_B - D C_B$ (1.3)
---	--

C	$\frac{d(C_C)}{dt} = -D C_C + k_2 C_B$ (1.4)
---	---

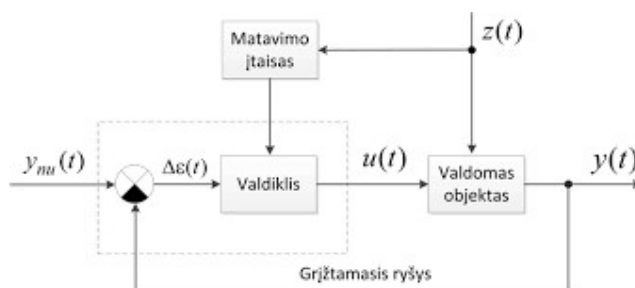
D	$\frac{d(C_D)}{dt} = -D C_D + \frac{1}{2} k_3 C_A^2$ (1.5)
---	---

Kadangi yra norima gauti komponento B koncentracijos palaikymo valdymo sistemą, susijusią su įvesties produkto A komponentu, reikia atkreipti dėmesį, kad šių dviejų komponentų energetiniai balansai nepriklauso nuo C ir D balansų, todėl dėmesys kreipiamas tik į A ir B komponentų diferencialines lygtis.

Šios dvi lygtys (1.2, 1.3) rodo *Van de Vusse* reaktoriaus atvirkščiosios reakcijos elgseną. Paprastai priešingos reakcijos procesai valdomi, naudojant įprastini PID reguliavimą arba atvirkščiosios reakcijos kompensatorių. Praktikoje atvirkščiosios reakcijos procesams valdyti, kai neminimalios fazės elementų įtaka nėra per daug stipri, priimtina reguliavimo kokybę galima gauti, naudojant įprastinius grįžtamojo ryšio reguliatorius.

1.4. Atvirkščiosios reakcijos valdymo sistemų tipai

1.4.1. Valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu



1.9 pav. Valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu struktūrinė schema

Automatinio reguliavimo teorija teigia, jog diferencialinė PID reguliavimo dėsnio dedamoji padeda valdančio parametro vertei būti generuojamai tokiai, kad galėtų užbėgti įvykiams už akių. Tai padaro šį dėsnį, pranašesniu už kitus, lyginant su P ir PI reguliavimo algoritmais, norint valdymo sistemos išėjimo dydžį nuostato link. PID reguliavimo dėsnis gelbsti, norint bent iš dalies numatyti neteisingą proceso elgseną ir prie jos prisitaikyti. [5]

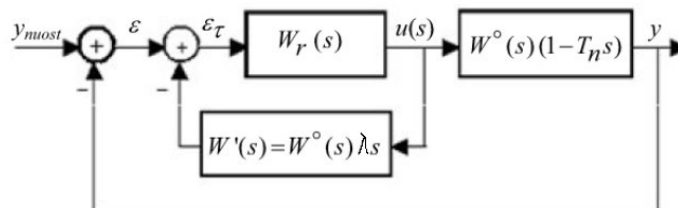
Viskas vyksta taip: esant pradiniam laiko momentui $t = 0$, proporcingoji bei integralinė reguliatoriaus parametru dedamosios generuoja klaidingą valdančio parametro vertę, dėl sudėtingos proceso dinamikos, išvestinė, gaunama grįžtamojo ryšio kontūru, yra su minuso ženklu. Dėl tos priežasties diferencialinė reguliatoriaus parametru dedamoji santykinai kompensuoja kitas dedamąsias, kurios gauna neteisingą informaciją. Vėliau, pasibaigus atvirkščiajai reakcijai, kuri klaidina reguliatorių, sistemos dinamika apsiverčia, išvestinė, grįžtamoju ryšiu gaunama teigiama ir reguliatoriaus suminis valdantysis parametras padidėja. [3]

1.4.2. Atvirkščiosios reakcijos kompensavimo valdymo sistema

Kai atvirkščiosios reakcijos procesuose didelė neigiamo diferencijavimo laiko pastovioji, valdymo sistemose rekomenduojama naudoti kompensatorius, kurių įvedimas leidžia padidinti reguliatoriaus stiprinimą, taip pagerinant uždarojo sistemos kontūro greitesnį veikimą.

Atvirkščiosios reakcijos procesų valdymo sistemose taip pat galima taikyti tą patį kompensavimo metodą, kaip ir skirtą vėlinimo laikui kompensuoti. Valdymo tikslas šiuo metodu, yra nuspėti išėjimą

procesu, remiantis įėjimu, dar nesulaukus, kol reguliuojamas išėjimas pasikeis. [18] Norint įgyvendinti šią sąlygą, reikia konfigūruoti įprastą schemą su grįžtamoju ryšiu:



1.10 pav. Valdymo sistema su atvirkščios reakcijos kompensatoriumi

Šioje struktūrinėje valdymo sistemos schemoje matoma, jog įvestas papildomas grįžtamojo ryšio kontūras, gaubiantis reguliatorių, kaip vidinis kontūras, formuoja koreguojantį signalą, kuris efektyviai panaikina atvirkščiosios reakcijos įtaką, grįžtamojo ryšio kontūre. [10]

Regulatorius sprendžia užduotį, kaip palaikyti norimą nuostatą ar kompensuoti atsiradusį trikdantį poveikį. Esamas procesas nepasikeičia, galima sakyti, atvirkščioji reakcija procese nedingsta, tačiau reguliavimo kontūras, sprendžia užduotį menamam procesui, be atvirkščiosios reakcijos ir taip negeneruoja klaidingo valdančio parametro, kas turėtų ženkliai pagerinti valdymo kokybę. [10]

Galima tapatinti, laiko vėlinimo ir atvirkščiosios reakcijos kompensatorius, nes jie abu yra jautrūs proceso netikslumams. Didžiausias šios valdymo sistemos modifikacijos privalumas yra tai, jog nereikalaujant papildomos įrangos, kitaip sakant, be jokių papildomų išlaidų šis metodas gali būti pritaikytas ir suderintas tame pačiame valdiklyje. [5]

1.4.3. Adaptyvioji valdymo sistema

Nemažai technologinių procesų pramonėje turi atvirkščiosios reakcijos charakteristikas. Vienas iš galimų būdų jas valdyti yra stiprinimo numatymas (angl. *gain scheduling*), arba kitaip adaptyvioji valdymo sistema. [17]

Ši valdymo sistemų modifikacija reikalinga, siekiant palaikyti aukštą valdymo kokybę dideliame valdomų parametrų kiekiui. Pagrindinis privalumas šios valdymo sistemos modifikacijos yra tas, jog ji yra tiesiog standartinių reguliatorių plėtinys, kas padeda lengviau suprasti schemą. Kitas privalumas, jog ši modifikacija lyginant su kitomis sudėtingomis sistemų modifikacijomis nereikalauja tokio didelio skaičiavimų kiekio.

Pagrindinė idėja adaptyvios valdymo sistemos yra padalinti proceso reguliavimo kontūrus į dvi dalis. Pirmasis kontūras būtų atsakingas už atvirkščiosios reakcijos kompensavimą atitinkamomis būsenomis. Antrasis būtų atsakingas už valdymo sistemos, be atvirkščiosios reakcijos, reguliavimo parametrų numatymą lokaliuose numatytuose taškuose. [9]

1.4.4. Valdymo sistema su neuroniniais tinklais

Modeliu pagrįstas prognozavimo valdymas (MPC) yra viena populiariausių valdymo sistemos metodikų tiek pramonėje, tiek mokslo darbų rašyme. Ši modifikacija sėkmingai įgyvendinta daugelyje pramoninių taikomųjų programų, rodančių kokybiškus rezultatus tiek sekant sistemos nuostatą, tiek kompensuojant trikdantį poveikį. MPC esmė yra apskaičiuoti būsimų valdymo signalų seką iš anksto atsižvelgiant į esamą modelį, tam panaudojant apmokymo algoritmus. [19]

Siekiant įgyvendinti MPC, naudojamas modelis, kurio paskirtis yra numatyti sistemos išėjimus ateityje. Ši išankstinė nuostata grindžiama praeities ir dabartinėmis įrenginio įėjimo vertėmis ir išėjimo vertėmis.

1.4.5. Hibridinės sistemos

Tai pat, atvirkščiosios reakcijos valdymo sistemoms stabilizuoti ir kokybiškai valdyti naudojamos įvairios kombinuotos sistemos. Jos gali būti sudarytos iš dviejų ar daugiau skirtingų valdymo sistemų modifikacijų, siekiant eliminuoti sistemoje atsirandančius padarinius dėl atvirkščiosios reakcijos. [20]

Hibridinių sistemų projektavimas beveik visais atvejais skirstomas į dvi užduotis turinčių reguliavimo kontūrų kūrimą. Pirmą užduotį kompensuoti procesą, kai jis yra neminimalioje fazėje, tai yra, kai jis rodo atvirkščiąją reakciją. Antra užduotis kokybiškai reguliuoti procesą, be atvirkščiosios reakcijos, nuostato link.

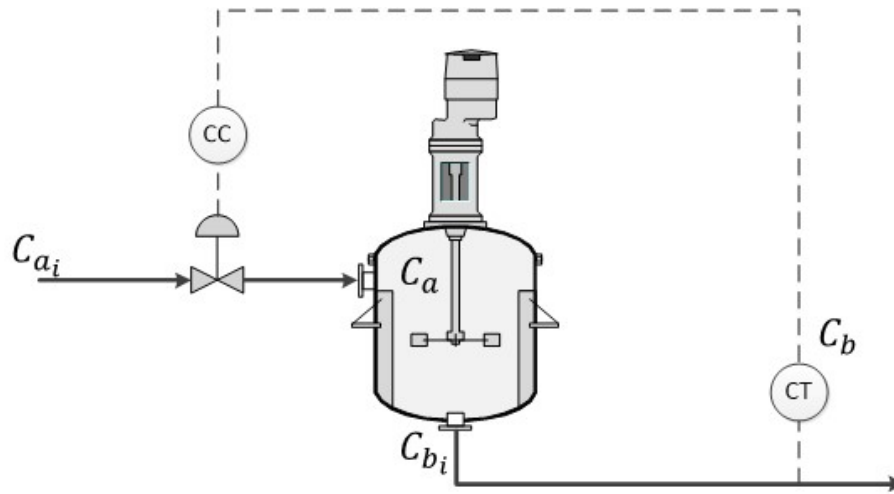
1.5. Darbe tiriamų valdymo sistemų modifikacijų aktualumas

Kaip matoma, atvirkščiosios reakcijos valdymo sistemų projektavimui galima naudoti daugumą jau gerai žinomų sistemos modifikacijų. Nuo paprastų iki sudėtingų ir jų įvairių kombinacijų. Šiame darbe toliau bus nagrinėjamos dvi valdymo sistemų modifikacijos.

- valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu ir PID reguliatoriumi;
- atvirkščiosios reakcijos kompensavimo sistema.

Šios valdymo sistemos nereikalauja jokios papildomos įrangos ir gali būti realizuotos tame pačiame valdiklyje. Darbo tyrimo tikslas yra išsiaiškinti ar kompensavimo grandies įvedimas į valdymo sistemą aiškiai pagerina valdymo sistemos kokybę sekant nuostatą ir kompensuojant trikdantį poveikį.

2. Van de Vusse reaktoriaus imitacinis modelis



2.1 pav. Van de Vusse reaktoriaus schema

Van de Vusse reakcijos kinetika yra aptinkama daugelyje reaktorių, kuriuose yra gaminamos cheminės medžiagos. Šis modelis yra pastoviai maišomo reaktoriaus imitacinis modelis, kuriame vyksta reakcijos su pamaitinimo reagentu C_{Af} ir jo skiedimu D , siekiant gauti atitinkamos koncentracijos produktą B . [9]

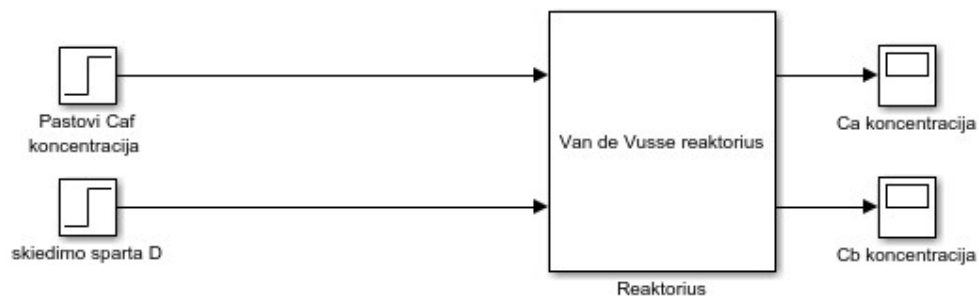
Šio tipo reaktoriuose sutinkama atvirkštinė reakcija, kuri įvyksta dėl įvairių cheminių reakcijų, kuomet reagentai, yra stipriai aktyvūs ir turi galimybę sudaryti šalutinius produktus

Šio reaktoriaus tikslas yra iš reagento A gauti reikiamos koncentracijos produktą B , atitinkamai jį skiedžiant. Todėl sudarant šio reaktoriaus imitacinį modelį buvo naudojamos balanso 1.2, 1.3 lygtys.

2.1. Valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu

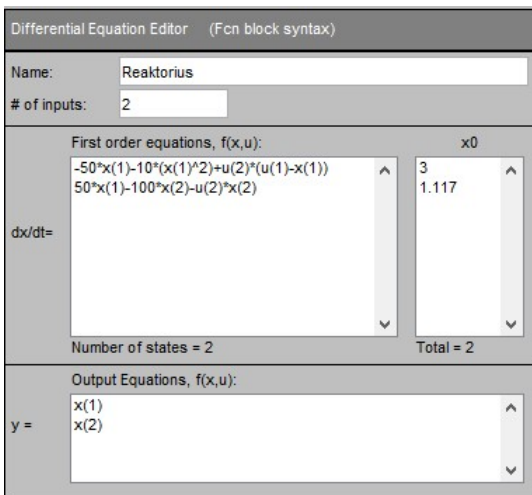
2.1.1. Proceso imitacinio modelio kūrimas *Matlab/Simulink* aplinkoje

Pirmiausia buvo sudarytas modelis *Matlab/Simulink* aplinkoje. Imitacinio modelio struktūra pavaizduota 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Van de Vusse reaktoriaus imitacinis modelis

Balanso lygtims aprašyti buvo naudojamas diferencialinės lygčių redagavimo (angl. *differential equation editor*) blokas, į kurį buvo įvestos *Van de Vusse* reaktoriaus balanso lygtys su pradinėmis vertėmis. Diferencialinių lygčių bloko struktūra pavaizduota 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Diferencialinių lygčių bloko struktūra

Reaktoriaus nominalioms sąlygoms apibrėžti buvo naudojami šie koeficientai, nurodyti 2.1 lentelėje.

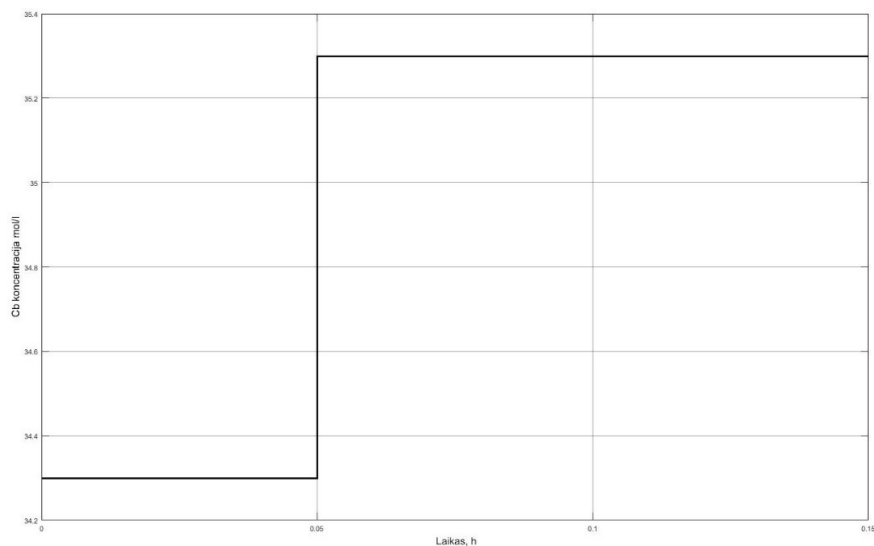
2.1 lentelė Nominalios sąlygos reaktoriuje

$k_1=50 \text{ h}^{-1}$
$k_2=100 \text{ h}^{-1}$
$k_3=10 \text{ l mol}^{-1} \text{ h}^{-1}$
$C_{Af}=10 \text{ mol l}^{-1}$
$C_A=3 \text{ mol l}^{-1}$
$C_B=1.117 \text{ mol l}^{-1}$
$D=34.3 \text{ h}^{-1}$

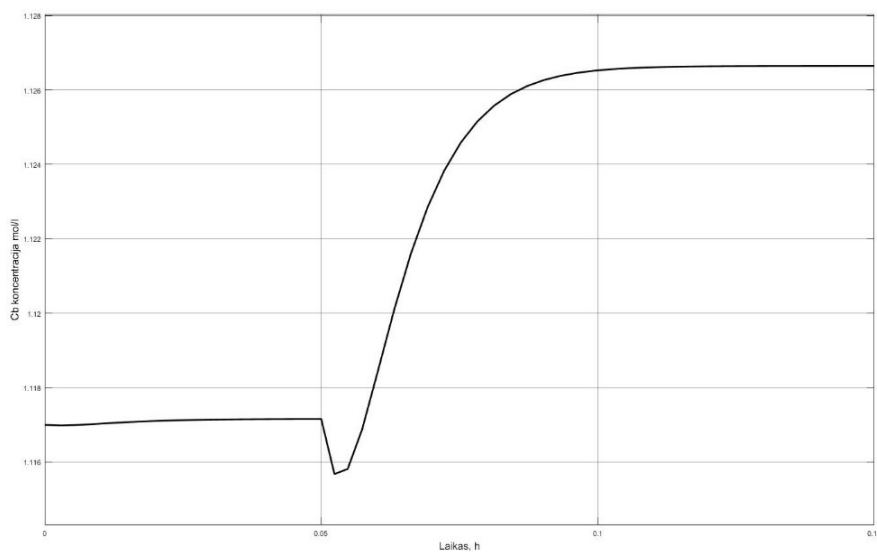
Siekiant korektiškai valdyti procesą, pirmiausia reikia iširti jo dinamiką. Automatinio valdymo teorijoje, šiam dalykui puikiai pasitarnauja objekto pereinamoji charakteristika. Pereinamoji charakteristika – schema gauta objekto išėjimo dydžiui kintant atitinkamą laiko tarpą, kol reikšmė nusistovi arba kinta nežymiai nusistovėjusios reikšmės atžvilgiu, kai jo įėjimas yra paveiktas bet kokios formos signalu. Vienas iš pereinamosios charakteristikos atvejų, kai objekto įėjimas yra keičiamas šuoliu, gali būti vadinamas reakcijos kreive. [1]

Toliau tiriama *Van de Vusse* reaktoriaus atvirkštinės reakcijos sistema. Šio objekto reakcijos kreivė gauta iš duomenų, kai objektas buvo valdomas rankiniu būdu. Kaip minėta anksčiau, reaktoriaus įėjimas buvo pakeistas šuoliškai ir stebima objekto išėjimo dydžio dinamika, kol galiausiai nusistovėjo pastovi reikšmė. Šuolinis poveikis, skiedimo sparta, pakito nuo $34,3 \text{ h}^{-1}$ iki $35,3 \text{ h}^{-1}$.

Skiedimo spartos šuolinės reakcijos ir junginio B koncentracijos pokyčio rezultatai pavaizduoti grafiškai 2.4 ir 2.5 pav.



2.4 pav. Skiedimo spartos šuolinės reakcijos grafikas



2.5 pav. C_B koncentracijos kitimo reakcijos kreivė

2.1.2. Van de Vusse reaktoriaus modelio sudarymas pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu mažiausių kvadratų metodu

Norint iširti ir pažinti tiriamą objektą bei jo reiškinius, efektyviausias būdas yra sudaryti jo imitacinį modelį. Tai puikiai pasitarnauja norint kokybiškai įvertinti procesą veikiančius dėsnius bei suprasti, kurie iš jų daro didžiausią įtaką, o kurie yra papildomi, antraeiliai. Reiškinių modeliavimas, įvairiose, tam skirtose aplinkose – tyrimo metodas, kuris yra pagrįstas eksperimentiniais, stebėjimo duomenimis ar būsenos lygtimis, o gauti kiekybiniai bei kokybiniai rezultatai gali būti naudojami realiam procesui valdyti ir reguliuoti. [1]

Siekiant kokybiškai ištirti šio objekto reakciją buvo naudotas matematinio modeliavimo metodas. Matematinis modeliavimas yra mokslinis objekto tyrimo metodas, grindžiamas norimų valdyti procesų nagrinėjimu, pasitelkiant matematinius aprašus. [6]

Pakeitus reaktoriaus įėjimą šuoliškai ir gavus atitinkamą išėjimo dydžio grafinę išraišką, ją reikėjo aproksimuoti, kuo tikslesne ir paprastesne perdavimo funkcijos išraiška. Šiai reakcijos kreivei identifikuoti buvo parinktas taikyti vienas iš aproksimavimo metodų - mažiausių kvadratų metodas, kuriam būdinga sumažinti atstumą tarp reakcijos kreivės ir aproksimuojančios kreivės išreikštos pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu.

Perdavimo funkcijos parametų identifikavimui buvo naudojami mažiausių kvadratų kriterijus. Keičiant laiko pastoviosios ir vėlavimo koeficientus, buvo tikrinamos perdavimo funkcijos vertės, lyginamos su išėjimo reakcijos kreive ir siekiama, kad jos kuo labiau sutaptų viena su kita.

Matlab/Simulink aplinkoje buvo sukurtas imitacinis modelis reakcijos kreivės aproksimavimui. Siekiant gauti geriausią aproksimacijos rezultatą, jis turėjo būti perkeltas su bloku „Constant“. Apskaičiavus stiprinimo koeficientą pagal 2.1 formulę, pagal mažiausių kvadratų kriterijų, buvo keičiamas vėlinimo laikas ir laiko pastovioji, tol, kol buvo gauta kokybiškiausia modelio išraiška.

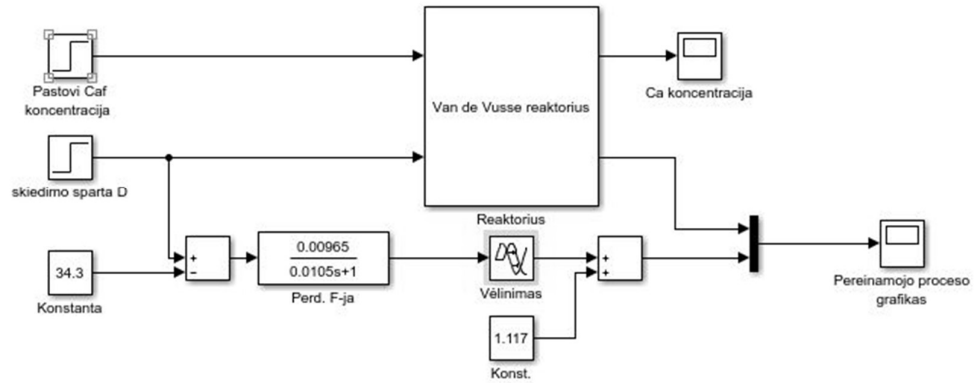
$$K_{pr} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Čia K_{pr} – aproksimuojančios perdavimo funkcijos stiprinimo koeficientas; Δy – nusistovėjusios ir pradinės C_B koncentracijos reikšmės pokytis, Δx – skiedimo spartos pokytis, T_{pr} – aproksimuojančios perdavimo funkcijos laiko pastovioji, τ_{pr} - aproksimuojančios perdavimo funkcijos vėlavimas. [6]

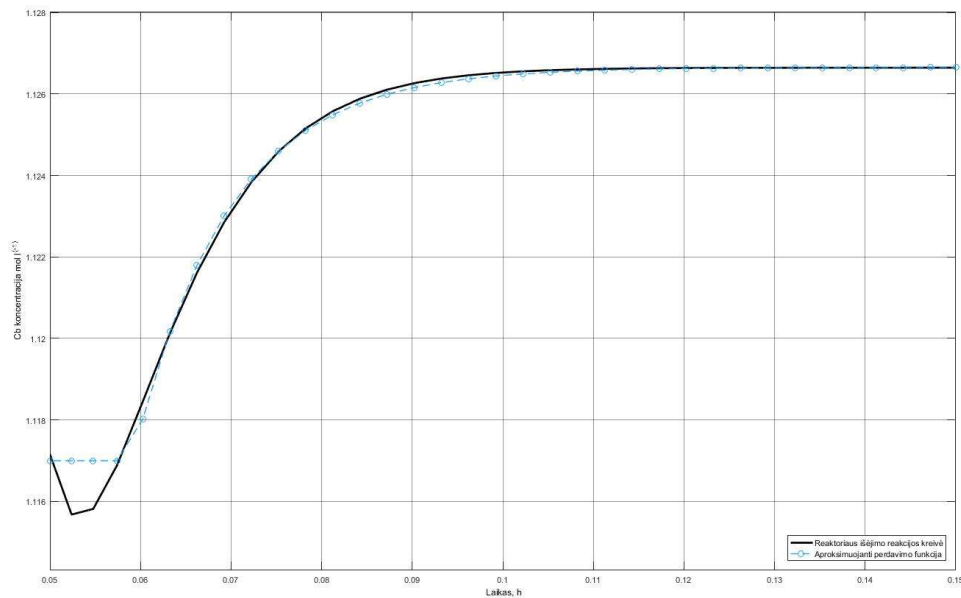
Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje *Matlab/Simulink* aplinkoje sukurtas imitacinis modelis 2.6 paveikslėlyje, gautas eksperimentinių duomenų palyginimas su aproksimuojančiu modeliu 2.7 paveikslėlyje.

2.2 lentelė Identifikuoto modelio parametrai pirmosios eilės perdavimo funkcija su vėlavimu

Dinaminio proceso parametrai	Dinaminio proceso rezultatai	Naudota formulė
K_{pr}	0.00965	2.1
T_{pr}	0.0105	
τ_{pr}	0.009	



2.6 pav. Matlab/Simulink imitacinis modelis komponento B koncentracijos kitimo duomenų apksimavimui



2.7 pav. Aproximuojančio modelio palyginimas su koncentracijos kitimo eksperimentiniais duomenimis

Sudarytas pirmos eilės su vėlavimu modelis buvo aprašytas perdavimo funkcija, kurios koeficientai geriausiai atitiko tiriamo stebėjimo duomenis [6,7]:

$$W_{pr}(s) = \frac{K_{pr}}{T_{pr}s + 1} e^{-\tau_{pr}s} \quad (2.2)$$

$$W_{pr}(s) = \frac{0.00965}{0.0105s + 1} e^{-0.009s} \quad (2.3)$$

Čia W_{pr} – apksimuojanti perdavimo funkcija, s – Laplaso kompleksinis kintamasis. [6]

Siekiant suderinti reaktoriaus B medžiagos koncentraciją grįžtamojo ryšio sistema su PID reguliatoriumi, joks papildomas blokas nėra naudojamas atvirkštinei reakcijai kompensuoti, todėl

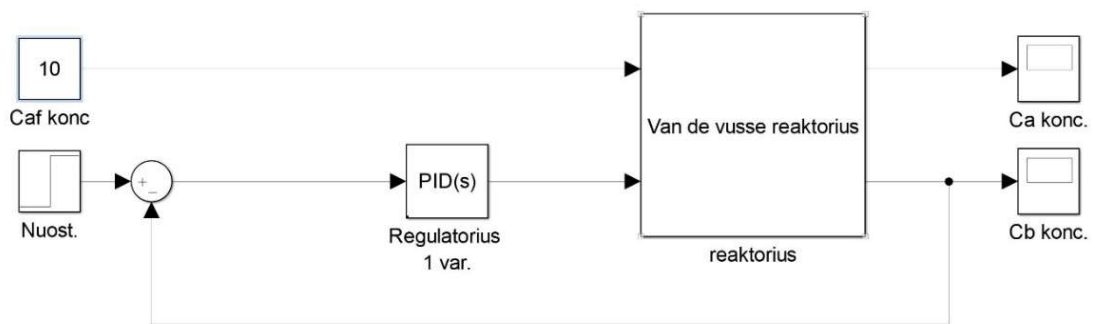
aprosimuojant objekto išėjimo kreivės dalį, kurioje pasireiškia atvirkštinė reakcija, ji yra konstatuojama ir apibrėžiama perdavimo funkcijoje, kaip transportinis vėlinimas.

2.1.3. Reguliavimo kontūro derinimas

Siekiant kokybiškai suderinti reguliatorių betkuriam technologinui procesui turi būti suformuluota užduotis – parinkti atitinkamą reguliavimo dėsnį, pritaikyti derinimo taisyklės ir gauti derinimo parametrus, dedamąsias, norint gauti optimalų proceso valdymą, atsižvelgiant į technologinius reglamentus.

Sudarius imitacinį modelį *Matlab/Simulink* aplinkoje skirtą reguliuoti procesui su grįžtamoju ryšiu ir PID reguliatoriumi. Regulatoriaus parametrus skaičiuoti naudojama, aproksimuotos pirmos eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu, stiprinimo, laiko pastoviosios ir vėlinimo vertės. Į objekto įėjimą buvo paduota nebe skiedimo sparta, o tirpalo B koncentracijos nuostatas. Nuostatas, visoms valdymo sistemoms, yra $C_B = 1,22 \text{ mol/l}$

Reaktoriaus reguliavimo tyrimui naudotas imitacinis modelis *Matlab/Simulink* aplinkoje pavaizduotas 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Valdymo sistemos modelis *Matlab/Simulink* aplinkoje

2.1.4. Reguliavimo dėsniai

Regulatoriaus derinimui buvo išbandytos derinimo taisyklės skirtos objektams kurių aproksimuotų perdavimo funkcijų vėlinimo ir laiko pastovios santykis yra $0,1 < \tau_{pr}/T_{pr} < 1$. Šis reguliavimo metodas labiau tinka tokio tipo objektams ir rodo geresnius reguliavimo rezultatus lyginant su Ziegler ir Nichols, kurio modifikacija ir yra šis metodas. Tačiau šio metodo trūkumas yra tas, jog jam būdingas didelis jautrumas tiek proceso parametrų kitimams, tiek pačiai sistemai. [5]

Cohen ir Coon PID reguliatoriui derinimo taisyklės:

$$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr} \tau_{pr}} \left(1,33 + \frac{\tau_{pr}}{4T_{pr}} \right) \quad (2.4)$$

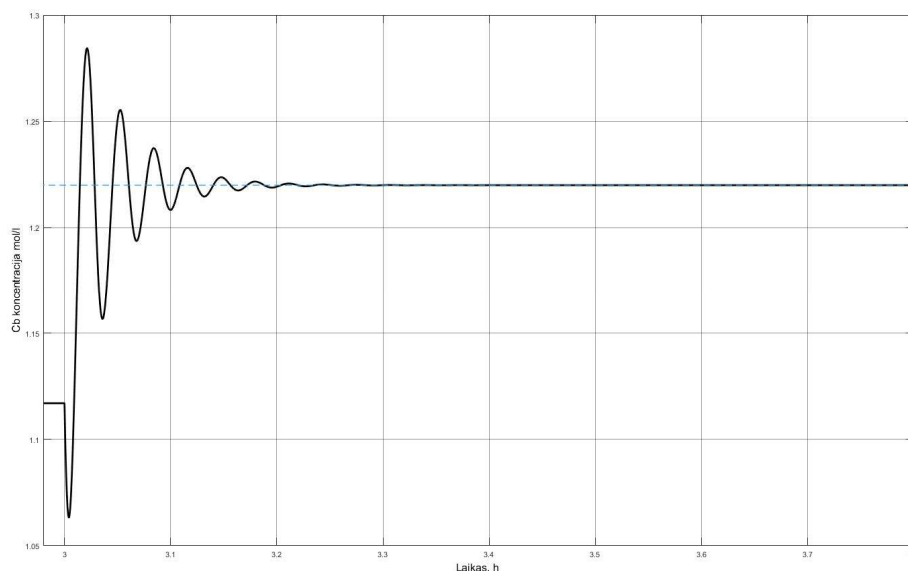
$$T_i = \frac{32 + 6\tau_{pr}/T_{pr}}{13 + 8\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr} \quad (2.5)$$

$$T_d = \frac{4}{11 + 2\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr} \quad (2.6)$$

2.3 lentelė Cohen ir Coon reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	186,7	2.4
T_i	0,01683	2.5
T_d	0,002831	2.6

Nekoregavus parametru, Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis, buvo gauti periodiniai svyravimai, proceso reguliavimas buvo neįmanomas. Yra žinoma, jog atvirkščiosios reakcijos reguliavimas grįžtamojo ryšio valdymo sistema su PID reguliatoriumi yra jautri procesų parametru kitimams, todėl reguliuojant PID reguliatoriumi, jame turi būti įvestas kuo mažesnis stiprinimas, kas padėjo gauti daug geresnį rezultatą. Reakcijos kreivės su pakoreguotu Cohen ir Coon derinimo taisyklių stiprinimu parodytas 2.9 paveiksle:



2.9 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

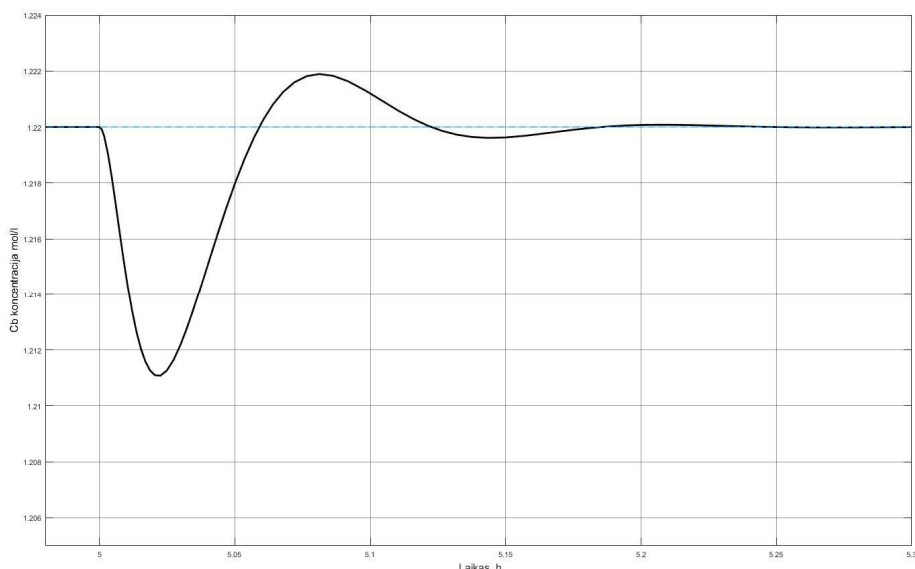
Taip pat reikia iširti nagrinėto reaktoriaus pereinamojo proceso kokybės rodiklius:

- Maksimalų leistiną dinaminį nuokrypį x_1 ;
- Leistiną reguliavimo trukmę t_r .

Kokybės rodikliai valdymo sistemai su grįžtamoju ryšiu naudojant Cohen ir Coon derinimo taisykles gauti:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0646 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,21582 [h]$

Taip pat buvo patikrinta reakcija į trikdantį poveikį, atsirandantį C_{Af} koncentracijoje padavimo reagente A. Koncentracija, procesui esant stabiliam, visiškai pasiekus nuostatą, sumažėjo 1%. Reakcijos kreivė valdymo sistemai kompensuojant trikdį parodyta 2.10 paveiksle:



2.10 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai valdymo sistemos reakcijai į trikdančio poveikio kompensavimą naudojant Cohen ir Coon derinimo taisykles gauti:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,00884 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,098 [h]$

Taip pat išbandytos kelios kitos derinimo taisyklės. Vienas iš jų yra Ziegler ir Nichols derinimo metodas. Derinimo parametrų vertės skaičiuojamos pagal žemiau nurodytas formules, gauti rezultatai pateikti 2.4 lentelėje.

$$K_r = \frac{1.2T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \quad (2.7)$$

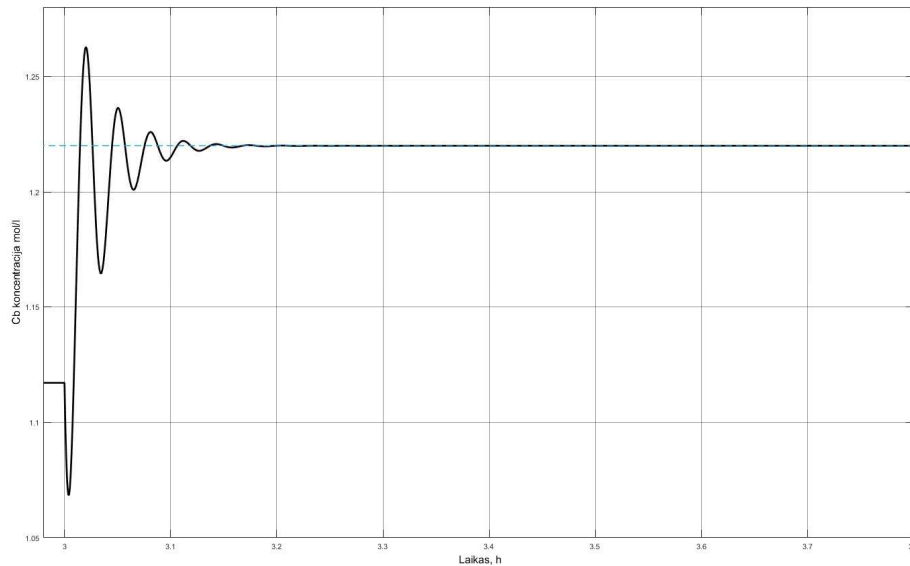
$$T_i = 2,0\tau_{pr} \quad (2.8)$$

$$T_d = 0,5\tau_{pr} \quad (2.9)$$

2.4 lentelė Ziegler ir Nichols reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	145,077	2.7
T_i	0,018	2.8
T_d	0,0045	2.9

Įvedus gautus duomenis į reguliavimo kontūrą, gauta reakcijos kreivė, kuri pavaizduota 2.11 paveiksle



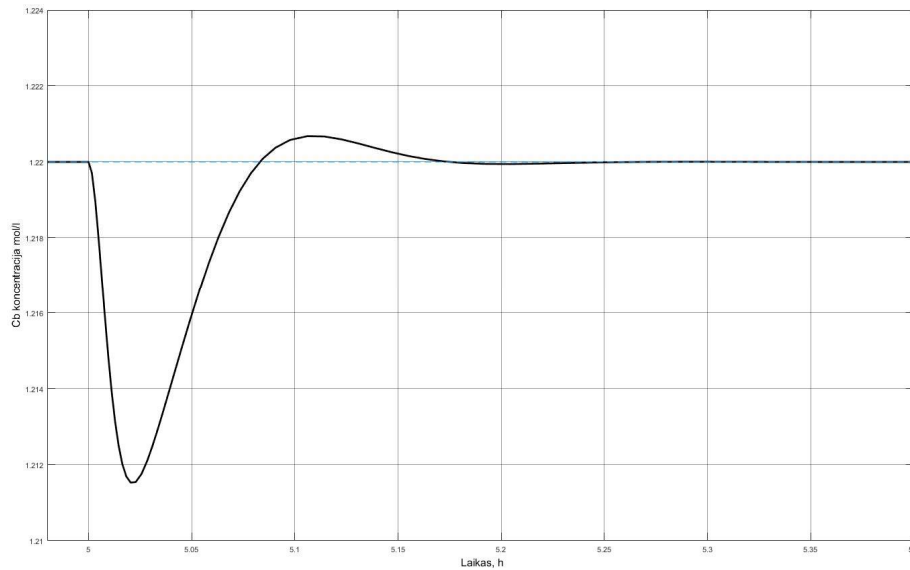
2.11 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Iš gautos reakcijos kreivės, apskaičiuoti kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0477 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,1855 [h]$

Atsižvelgiant į reakcijos kreivės duomenis matoma, jog maksimali dinaminė nuokrypa gauta mažesnė už Cohen ir Coon derinimo parametrais suderinto regulatoriaus reakcijos kreivę, o reguliavimo trukmė trumpesnė – procesas stabilizuojasi ir neviršija statinės paklaidos greičiau.

Valdymo sistemos reakcija į trikdančio poveikio kompensavimą, Ziegler ir Nichols derinimo parametrais parodyta 2.12 paveiksle



2.12 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Iš gautos reakcijos kreivės apskaičiuoti kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,00847 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,12975 [h]$

Ziegler ir Nichols derinimo metodu suderinus reguliavimo kontūrą, maksimali dinaminė nuokrypa buvo sąlyginai panaši, o reguliavimo trukmė šiek tiek ilgesnė.

Taip pat bandoma nuostato sekimo ir reakcijos į trikdantį poveikį valdymo sistema suderinta pagal IMC derinimo taisyklės. Teigiama vidinio modelio valdymo sistemų savybė yra ta, kad projektavimo metu galima įvertinti sistemos nejautrumą. Nejautrumas gali būti reguliuojamas, kokybiškai parinkus filtrą. Tenkinamas sutarimas tarp sistemos nejautrumo ir greitaieigiškumo pasiekiamas naudojant filtro laiko pastoviąją, kaip derinimo parametraž. [5] Tam kad, būtų gaunamas kokybiškiausias derinimo rezultatas patogu keisti T_f vertę. Derinimo taisyklės parodytos žemiau ir gauti rezultatai pavaizduoti 2.5 lentelėje.

$$K_r = \frac{2T_{pr} + \tau_{pr}}{2K_{pr}(T_f + \tau_{pr})} \quad (2.10)$$

$$T_i = T_{pr} + \frac{\tau_{pr}}{2} \quad (2.11)$$

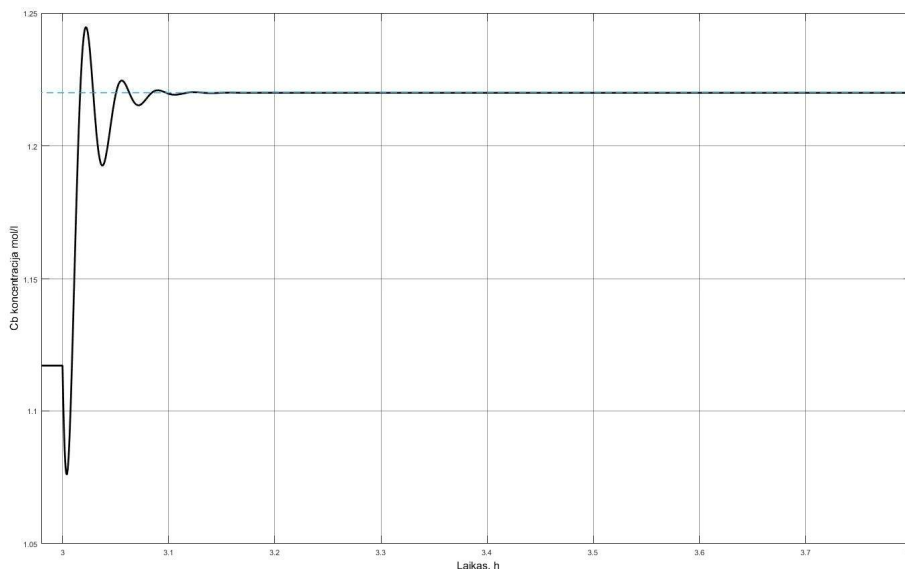
$$T_d = \frac{T_{pr}\tau_{pr}}{2T_{pr} + \tau_{pr}} \quad (2.12)$$

$$\frac{T_f}{\tau_{pr}} > 0,25 \quad (2.13)$$

2.5 lentelė IMC regulatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	138,169	2.10
T_i	0,015	2.11
T_d	0,00315	2.12
T_f	0,00225	2.13

Įvedus parametrus į reguliatorių, gauta reakcijos kreivė pavaizduota 2.13 paveiksle



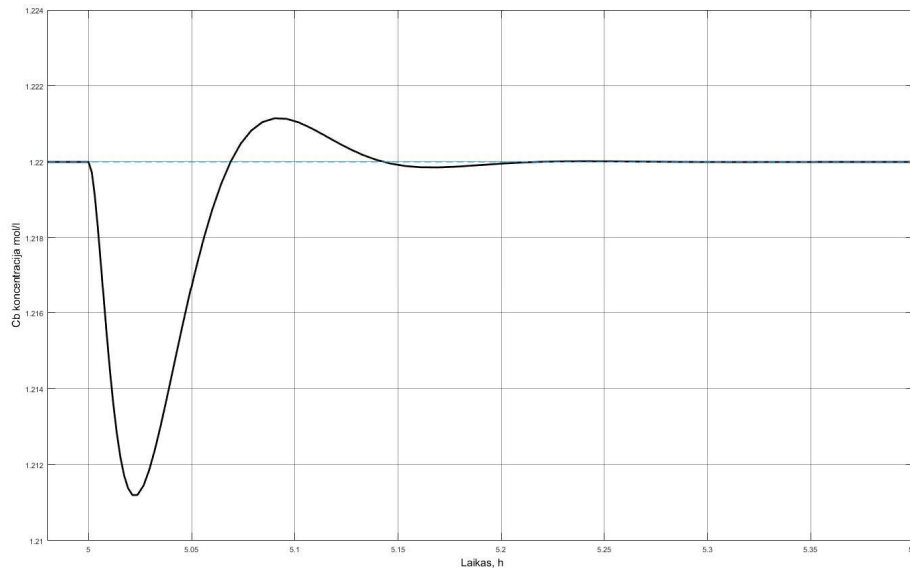
2.13 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostato dydį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,02745 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,111 [h]$

Valdymo sistemos reguliavimo kontūrai pritaikius vidinio modelio derinimo taisykles parodė geriausią kolkas gautą rezultatą, lyginant jau išbandytus tris metodus. Tiek maksimali dinaminė nuokrypa - mažiausia, tiek reguliavimo trukmė – trumpiausia.

Valdymo sistemos reakcijos kreivė į trikdančio poveikio kompensavimą, suderinus reguliatorių, pagal IMC derinimo taisykles parodyta 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,008916 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,12585 [h]$

Suderinus sistemą IMC derinimo taisyklėmis, reakcija į trikdantį poveikį ir jo kompensavimą, parodė sąlyginai panašius kokybės rodiklius. Maksimali dinaminė nuokrypa buvo šiek tiek didesnė už kitų dviejų derinimo taisyklių dinamines nuokrypas, reguliavimo trukmė panaši į Ziegler ir Nichols derinimo parametrais suderintą reguliavimo kontūrą.

Taip pat, reguliatoriaus derinimui, valdymo sistemoje, buvo išbandytas ITAE derinimo metodas. Šis derinimo metodas turi atskiras reguliavimo parametrų parinkimo taisykles nuostatui sekti ir trikdančiam poveikiui kompensuoti. Nuostato sekimo taisyklės:

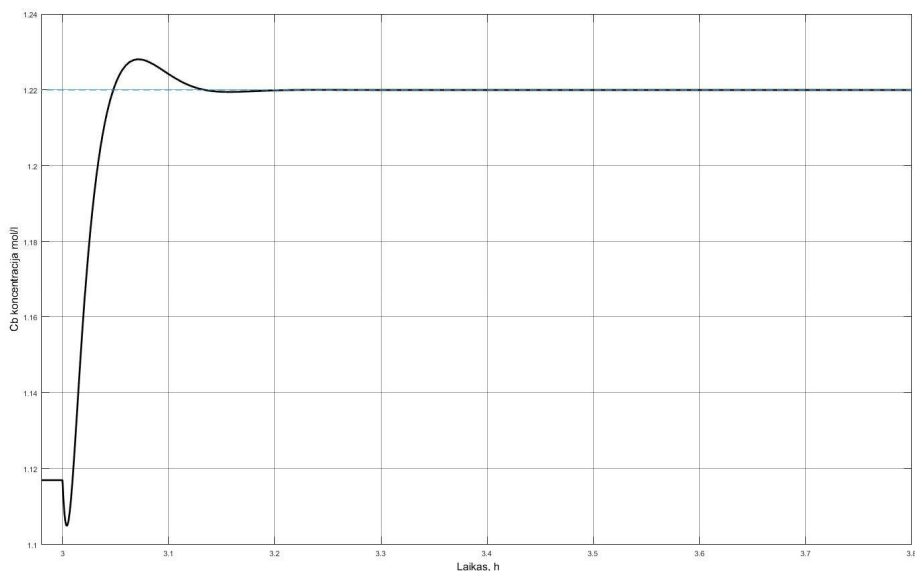
$$K_r = \frac{0,965}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,855} \quad (2.14)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{\left[0,796 - 0,147 \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) \right]} \quad (2.15)$$

$$T_d = 0,308 T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,929} \quad (2.16)$$

2.6 lentelė ITAE nuostatui reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	114,0879	2.14
T_i	0,0157	2.15
T_d	0,0028	2.16



2.15 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių ITAE nuostatui skirtomis derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,00809 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,1269 [h]$

Atsižvelgiant į visų valdymo sistemų, nuostato sekimo, reakcijos kreives ir kokybės rodiklius matyti, jog ITAE nuostato derinimo taisyklės leido pasiekti geriausius rezultatus. Maksimali dinaminė nuokrypa buvo mažiausia, o valdymo sistemos reguliavimo trukmė nežymiai didesnė už IMC derinimo taisyklėmis suderintą sistemą.

Trikdančio poveikio kompensavimo derinimo taisyklės:

$$K_r = \frac{1,357}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947} \quad (2.17)$$

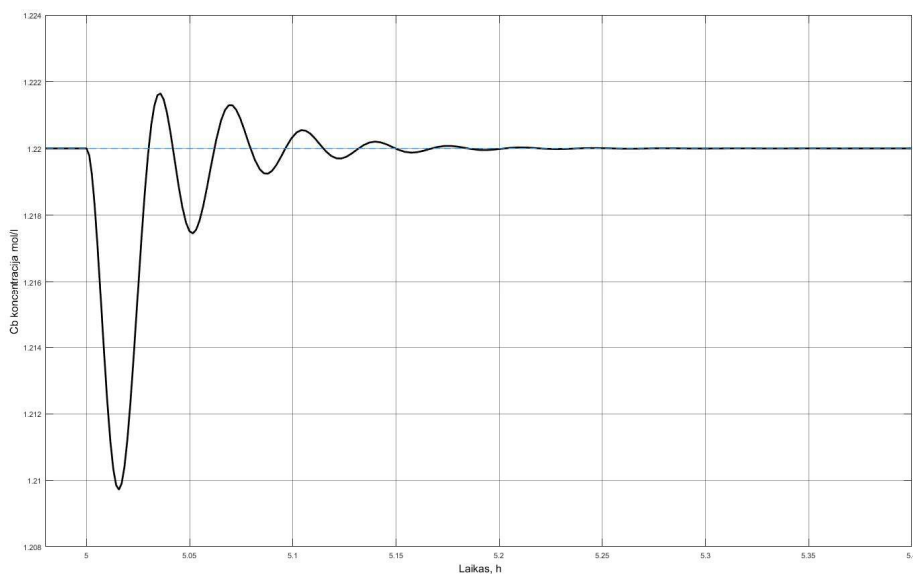
$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738} \quad (2.18)$$

$$T_d = 0,381 T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995} \quad (2.19)$$

2.7 lentelė ITAE kompensuoti trikdžiui reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	162.7238	2.17
T_i	0,0111	2.18
T_d	0,0034	2.19

Reakcijos kreivė kompensuojant trikdantį poveikį parodyta 2.16 paveiksle.



2.16 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių ITAE trikdžiu skirtingomis derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

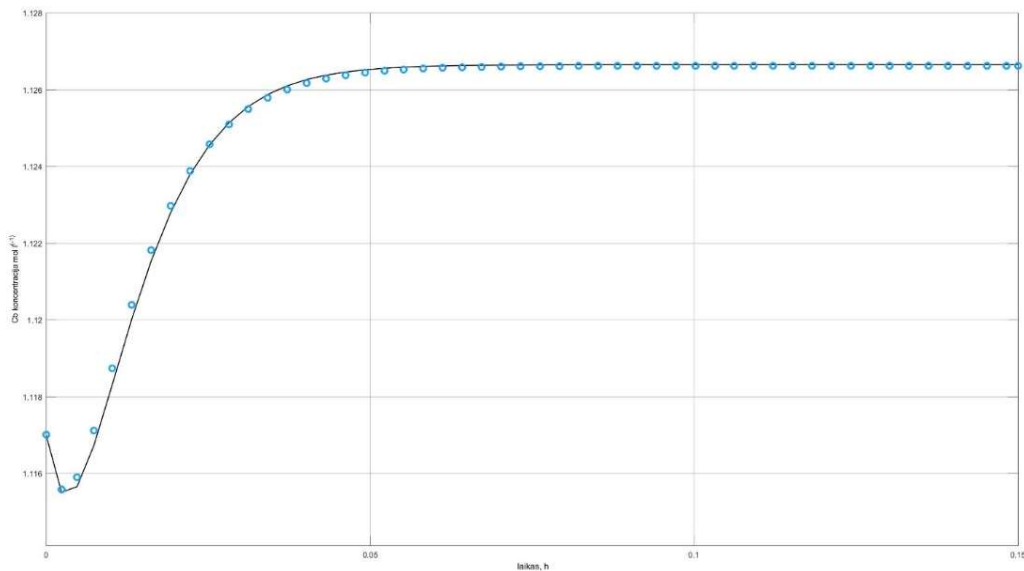
- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,01028 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,10705 [h]$

Trikdančio poveikio kompensavimas valdymo sistemoje, suderintoje pagal ITAE trikdžio taisykles, parodė didžiausią maksimalią dinaminę nuokrypą, iš visų metodų, perreguliuavimų skaičius taip pat buvo didžiausias, tačiau reguliavimo trukmė buvo trumpesnė už Ziegler ir Nichols, bei IMC derinimo taisykles.

2.2. Kompensavimo valdymo sistema

Suderinus grįžtamojo ryšio sistemą su PID reguliatoriumi, keturiomis reguliatorių derinimo taisyklėmis, toliau palyginimui reikia suderinti kitą reguliavimo sistemą su kompensavimo grandimi. Tam reikalinga ištirti objekto reakciją į vidinį reguliatorių. Objekto reakcijos ištyrimui reikia aproksimuoti gautus duomenis kiek įmanoma tikslesne išraiška, nes vėliau ji bus naudojama kompensavimo grandžiai generuoti, kas turėtų valdymo sistemoje rodyti geresnius rezultatus už paprastą grįžtamojo ryšio sistemą su PID reguliatoriumi.

Objekto reakcijos modelio aproksimavimui buvo panaudotas imitacinis modelis atvaizduotas 2.17 paveiksle. Į modelio įėjimą buvo paduotas šuolinis poveikis, apskaičiuotas stiprinimo koeficientas bei parinkti laiko pastovioji ir vėlavimas taip, kad geriausiai atitiktų eksperimentinius duomenis.



2.17 pav. Reakcijos kreivės palyginimas su identifikuota perdavimo funkcija

Gautas aproksimacijos modelis buvo aprašytas perdavimo funkcija, kurios koeficientai geriausiai atitiko tiriamo stebėjimo duomenis [6,7]:

$$W_{pr}(s) = \frac{0.00965 - 0.00005211s}{0.000045s^2 + 0.01435s + 1} \quad (2.20)$$

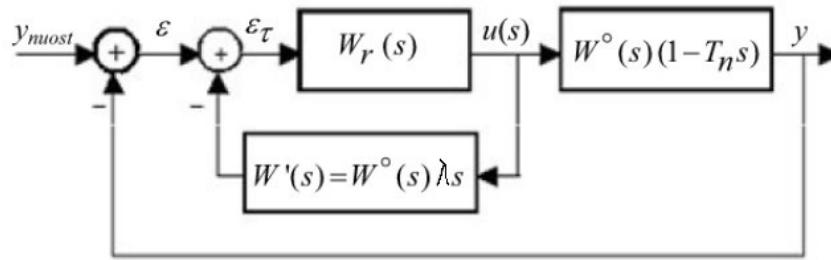
Čia W_{pr} – aproksimuojanti perdavimo funkcija, s – Laplaso kompleksinis kintamasis. [6]

Tuomet atvirkščiosios reakcijos perdavimo išraiška turi būti išskaidyta atitinkamu būdu:

$$W(s) = W^o(s)(1 - T_n s) \quad (2.21)$$

Čia $W^o(s)$ – proceso perdavimo funkcijos dalis be elemento, turinčio teigiamą nulį. [5,10]

2.18 paveiksle parodyta struktūrinė valdymo sistema, kurioje atvirkščiosios reakcijos poveikiui mažinti įvesta kompensavimo grandis.



2.18 pav. Kompensavimo valdymo sistemos struktūrinė schema

Kaip matoma, kompensavimo kontūras susideda iš perdavimo funkcijos $W'(s)$. Norint sureguliuoti sistemą, koeficientą λ reikia parinkti tokį, kad išėjimo dydis, apibūdinamas atstojamą perdavimo funkcija $W^*(s)$, perduodamas grįžtamuoju ryšiu į reguliavimo kontūrą, būtų, kaip iš „standartinio“ proceso, tai yra nebūtų matomas atvirkščiosios reakcijos procesas. [5]

$$W^*(s) = W^o(s)[1 + (\lambda - T_n)s] \quad (2.23)$$

Tam, kad tariamos reakcijos perdavimo funkcija $W^*(s)$ neturėtų teigiamo nulinio (atvirkštinės reakcijos) per grįžtamąjį ryšį reguliatoriui, λ turi būti parinktas toks, kad

$$\lambda \geq T_n \quad (2.24)$$

Tokiu atveju vidiniame kontūre yra suformuojamas koreguojantis signalas, kuris kokybiškai panaikina atvirkščiosios reakcijos poveikį grįžtamojo ryšio kontūre. Atvirkščiosios reakcijos kompensavimo grandis, kaip ir vėlinimo kompensatorius yra labai jautrus imitacinio modelio netikslumams. [5]

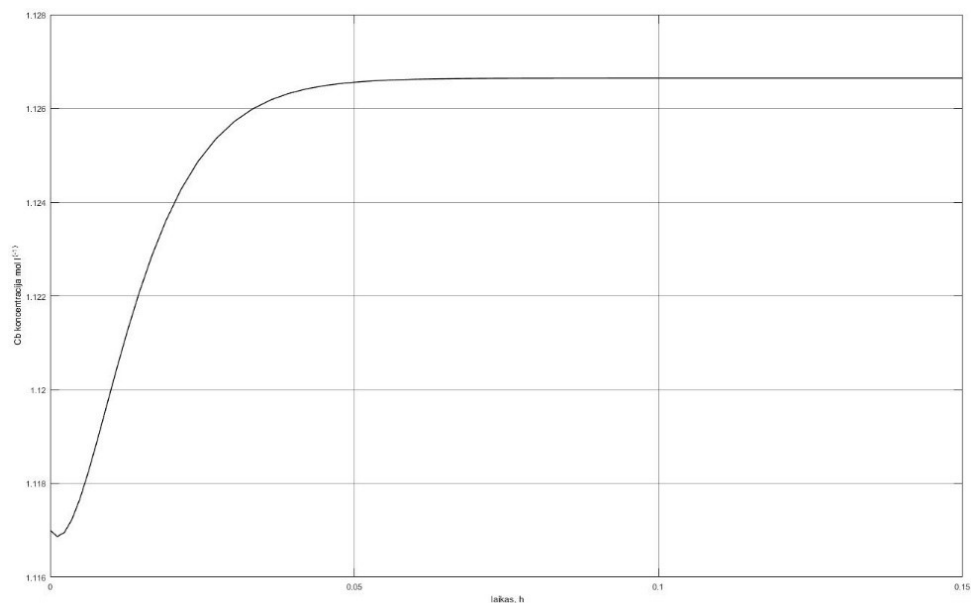
Tam kad, būtų parinkta λ vertė, kuri atitinka 2.24 sąlygą ir yra korektiška proceso atžvilgiu yra keli būdai. Kai imitacinis modelis ir valdomas objektas neatitinka, yra priimta pasirinkti λ didesnį už T_n . Tačiau reikia daryti tai atsargiai ir stebėti rezultatus, nes per daug didelis koeficientas λ per daug pagreitins $W^*(s)$ reakciją lyginant su $W^o(s)$ ir tai sukels valdymo kontūro inertiškumą.

Dažnu atveju, kokybiškas pasirinkimas yra

$$\lambda = 2T_n \quad (2.25)$$

Todėl, kad parinkus tokį λ , standartiniam procese, proceso išėjimo kvadratinė nuokrypa nuo nustatyto dydžio vertės yra minimizuojama. [5]

Tačiau šio proceso atveju, šis pasirinkimas nėra visiškai kokybiškas. Parinkus koeficientą λ pagal 2.25 formulę matoma, kad perdavimo funkcijos $W^*(s)$ atvirkštinė reakcija nėra iki galo eliminuota ir reakcijos kreivė neatrodo lyg būtų iš „normalaus“ proceso. Reakcijos kreivė, parinkus λ pagal 2.25 formulę, pavaizduota 2.19 paveiksle.

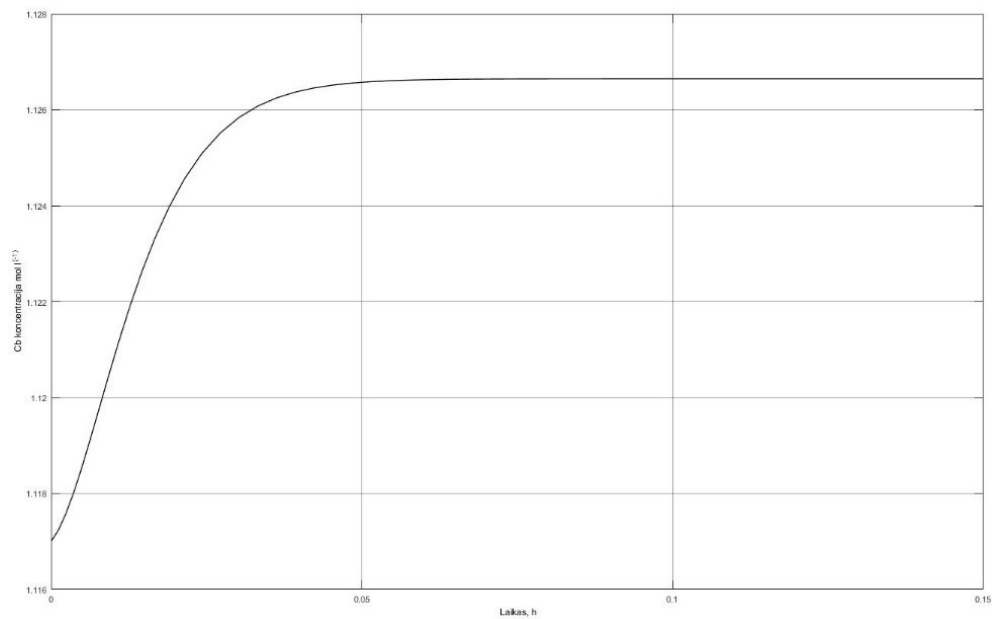


2.19 pav. Reakcijos kreivė, kai kompensavimo kontūre $\lambda = 2T_n$

Todėl norint sunormalizuoti atstojamojo proceso perdavimo funkciją $W^*(s)$, buvo reikalinga parinkti kitą koeficiento λ vertę. Geriausia kokybė buvo gauta kai λ atitiko vertę $3T_n$. Kompensavimo kontūro perdavimo funkcija $W'(s)$ gauta

$$W'(s) = \frac{0.0000015085845s}{0.000041405s^2 + 0.01365s + 1} \quad (2.26)$$

Reakcijos kreivė, prie proceso prijungus kompensavimo kontūrą parodyta 2.20 paveiksle



2.20 pav. Reakcijos kreivė, kai kompensavimo kontūre $\lambda = 3T_n$

Šios reakcijos kreivės aproksimavimui pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu išbandytas Smith'o metodas. Šis metodas yra paremtas imitacinio modelio ir proceso reakcijos kreivės sutapimu

dviejuose taškuose, kurie yra greito kitimo srityje, tai yra reakcijos kreivės perlinkyje. Perdavimo funkcijos paieškai naudojami du taškai t_1 ir t_2 yra apskaičiuojami pagal formules

$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (2.27)$$

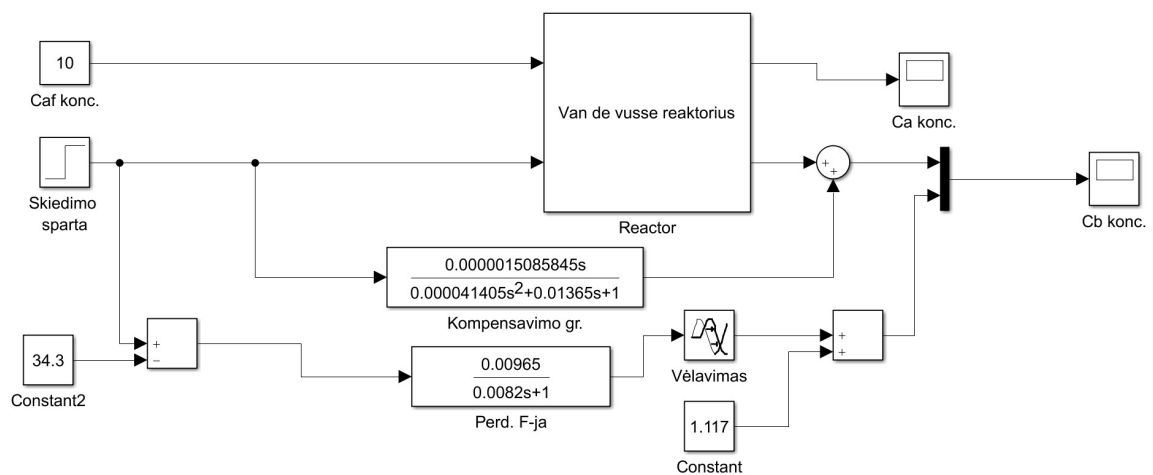
$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr} \quad (2.28)$$

Taškai t_1 ir t_2 yra atitinkami susikirtimo taškai x ašyje reakcijos kreivės su vertėmis $y(t_1) = 0,283y(\infty)$ ir $y(t_2) = 0,632y(\infty)$. Apskaičiuotus reikšmes buvo gauti rezultatai, pavaizduoti 2.8 lentelėje

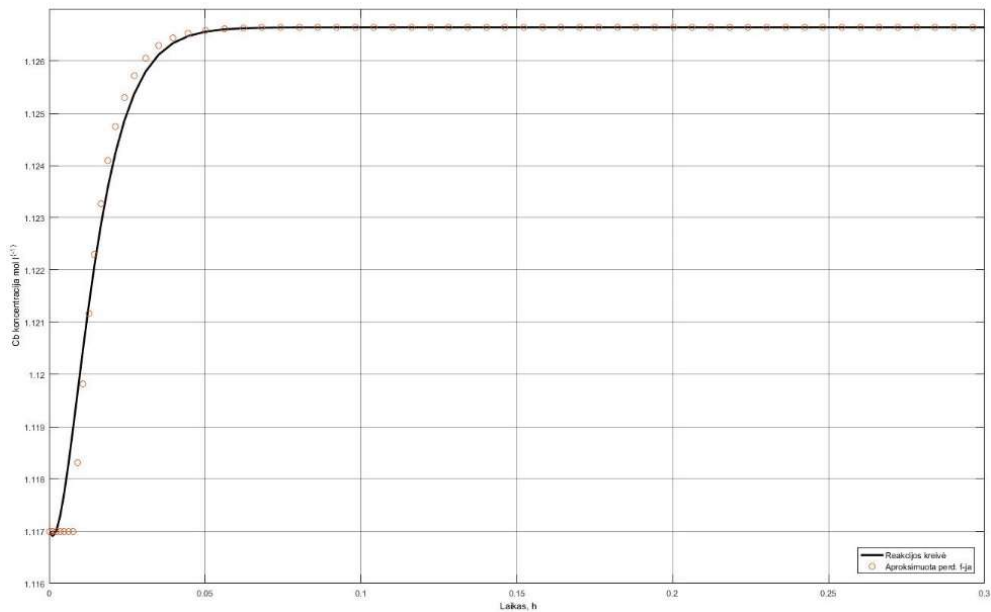
2.8 lentelė perdavimo funkcijos vertės Smith'o metodu

Parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
t_1	0,0107 h	
t_2	0.0162 h	
T_{pr}	0,0082 h	2.27
τ_{pr}	0,008 h	2.28
K_{pr}	0,00965	2.1

Gautos vertės patikrintos. Matlab/Simulink aplinkoje sukurtas aproksimacijos imitacinis modelis pavaizduotas 2.21 paveiksle, reakcijos kreivės palyginimas su apskaičiuotomis pirmos eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu vertėmis pavaizduotas 2.22 paveiksle.



2.21 pav. Imitacinis modelis skirtas palyginti reakcijos kreivę su Smith'o metodu gautais perdavimo funkcijos parametrais

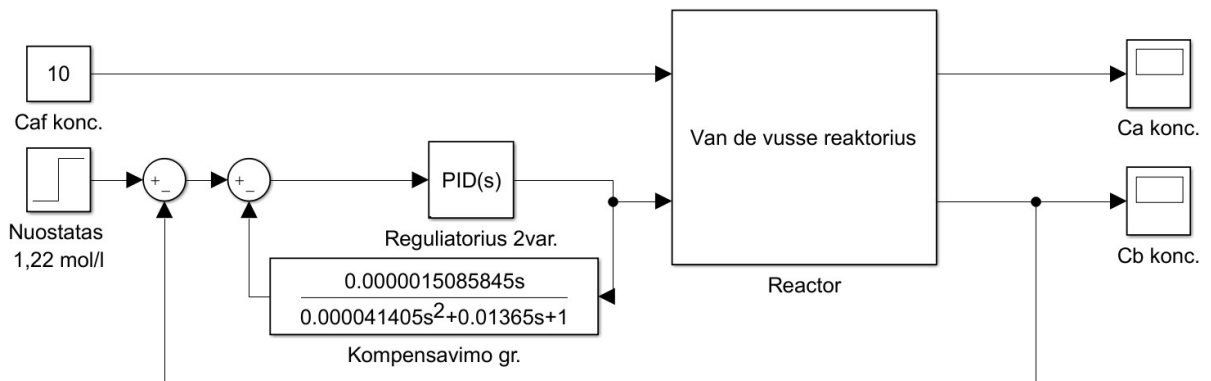


2.22 pav. Reakcijos kreivės palyginimas su Smith'o metodu gautais perdavimo funkcijos parametrais

Gautas aproksimacijos modelis buvo aprašytas perdavimo funkcija, kurios koeficientai geriausiai atitiko tiriamo stebėjimo duomenis [6,7]:

$$W_{pr}(s) = \frac{0.00965}{(0.0082s + 1)} e^{-0.008s} \quad (2.29)$$

Aproksimavus atstojamojo proceso perdavimo funkciją $W^*(s)$ pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija. Kitas žingsnis yra sukurti imitacinį valdymo sistemos modelį Matlab/Simulink aplinkoje su kompensavimo kontūru. Valdymo sistemos su kompensavimo grandimi imitacinis modelis Matlab/Simulink aplinkoje pavaizduotas 2.23 paveiksle.



2.23 pav. Kompensavimo valdymo sistemos imitacinis modelis

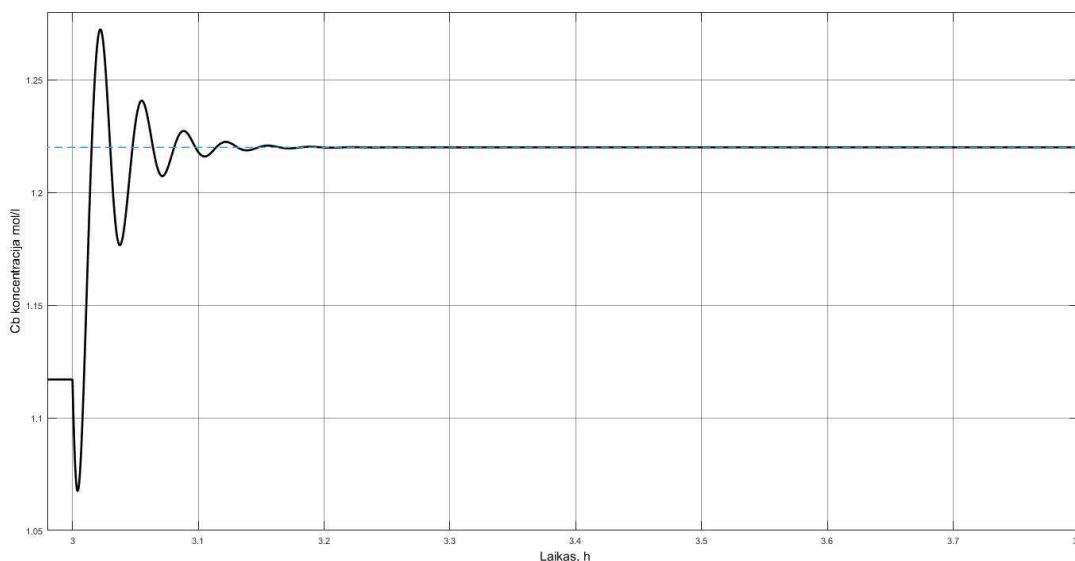
Regulatorius šiame imitaciniame modelyje derinamas, ne atvirkščios reakcijos procesui, o atstojamam procesui, kurio perdavimo funkcija yra $W^*(s)$ ir yra aproksimuota pirmos eilės

perdavimo funkcija su vėlavimu. Regulatoriaus suderinimui naudojami tie patys vienkontūrių sistemų derinimo metodai. Kadangi imituojamas procesas nerodo atvirkštinės reakcijos, derinant reguliatorių galima naudoti didesnę stiprinimo koeficientą, nei kad būtų galima be kompensavimo kontūro. Tačiau dėl tiriamo proceso ir imitacinio perdavimo funkcijos modelio neatitikimo stiprinimas turi būti didinamas atsargiai, palaipsniui. Regulatoriaus derinimui buvo naudojamos Cohen ir Coon derinimo taisyklės. Derinimo parametrų vertės pagal Cohen ir Coon derinimo taisyklės parodytos 2.9 lentelėje

2.9 lentelė Cohen ir Coon reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	167	2.4
T_i	0,01455	2.5
T_d	0,0024708	2.6

C_B koncentracijos kitimo reakcijos kreivė į reguliatoriavimo kontūrą įvedus derinimo parametrus iš 2.9 lentelės parodyta 2.24 paveiksle.

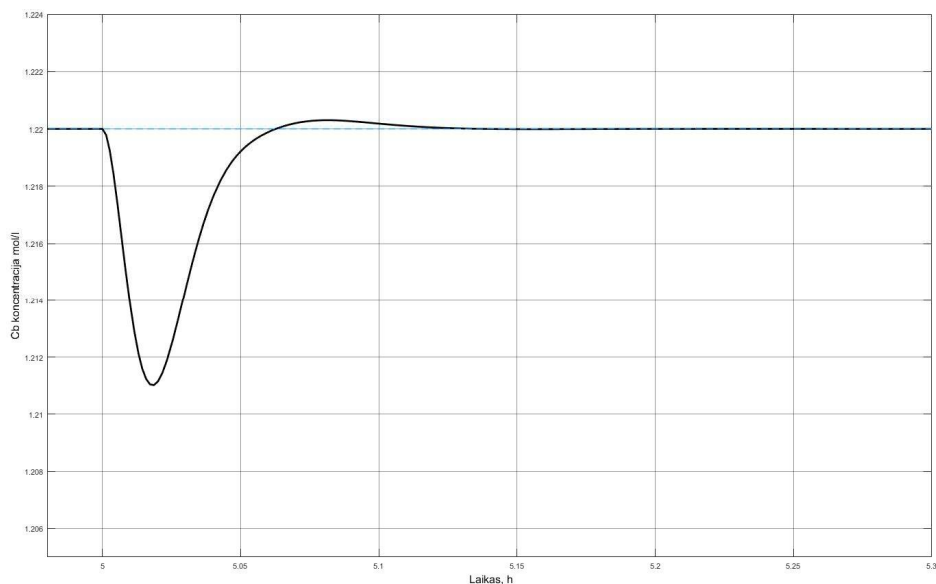


2.24 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai valdymo sistemai su kompensavimo kontūru naudojant Cohen ir Coon derinimo taisyklės gauti:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0525 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,1602 [h]$

Taip pat, buvo iširta valdymo sistemos kokybė, kompensuojant trikdantį poveikį. Reakcijos kreivė pavaizduota 2.25 paveiksle.



2.25 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

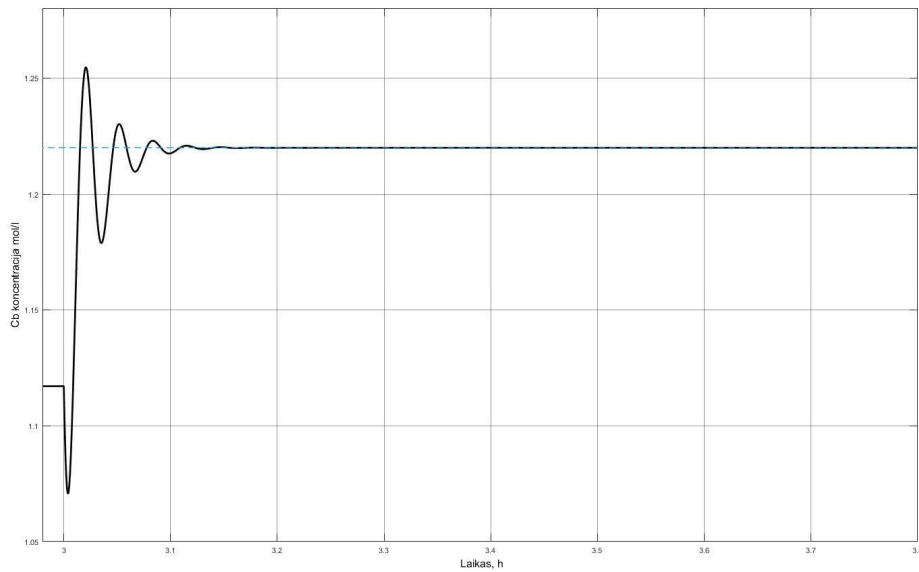
Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0085 [mol\ l^{(-1)}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,0525 [h]$

Taip pat buvo išbandytos Ziegler ir Nichols derinimo taisyklės, skirtos pirmos eilės su vėlavimu modelio derinimui. Reguliatoriaus derinimo parametrai pavaizduoti 2.10 lentelėje

2.10 lentelė Ziegler ir Nichols reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	127,4611	2.7
T_i	0,016	2.8
T_d	0,004	2.9

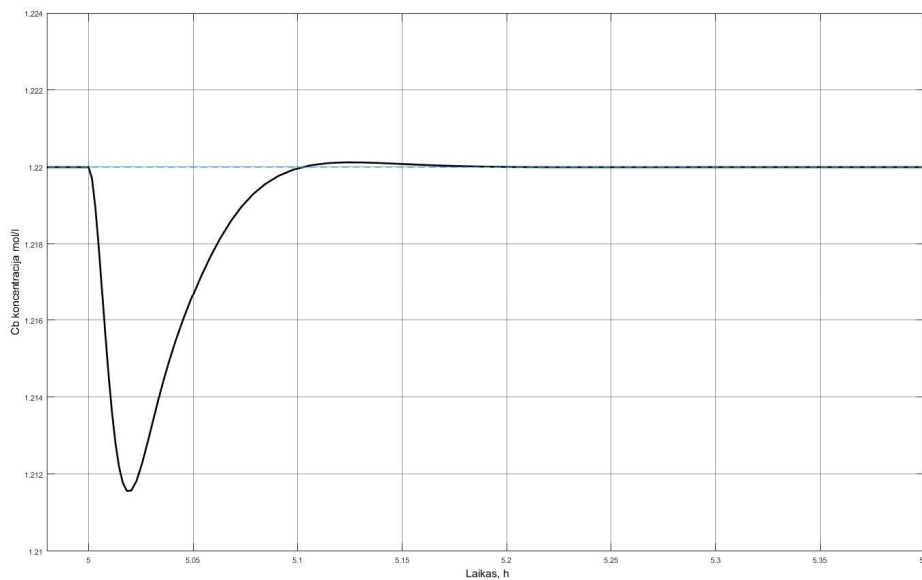


2.26 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,03122 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,136 [h]$

Ištyrus valdymo sistemos reakcijos kreivę, suderinus reguliavimo kontūrą, Ziegler ir Nichols derinimo parametrais matyti, jog maksimali dinaminė nuokrypa yra mažesnė už Cohen ir Coon derinimo parametru gautą rezultatą, o reguliavimo trukmė trumpesnė.



2.27 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

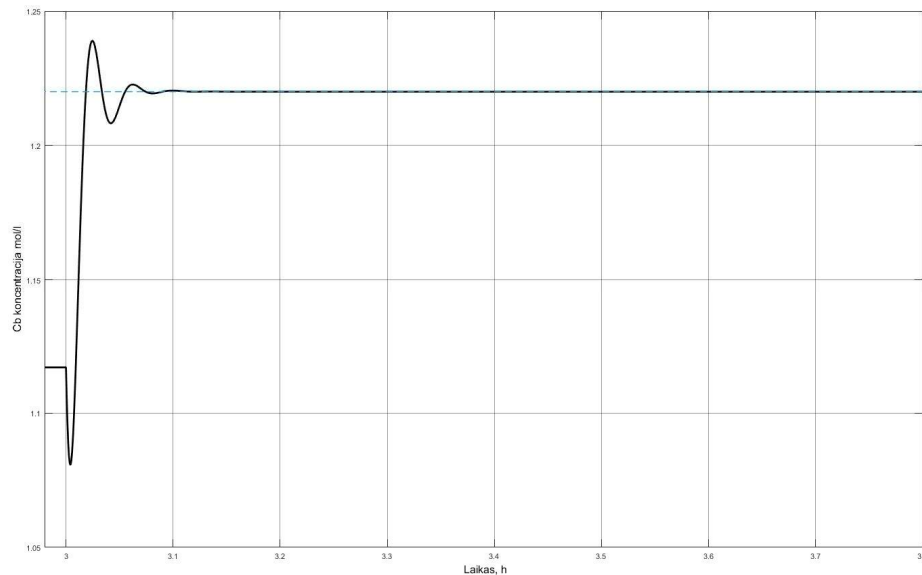
- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0084 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,0831 [h]$

Lyginant Cohen ir Coon bei Ziegler ir Nichols derinimo parametrus, didelio skirtumo maksimalioje dinaminėje nuokrypoje nepastebėta, tačiau Ziegler ir Nichols reguliavimo trukmė buvo gauta ilgesnė.

Valdymo sistemos nuostato sekimui ir trikdžio kompensavimui buvo išbandytos IMC derinimo taisyklės

2.11 lentelė IMC reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	126,42	2.10
T_i	0,0122	2.11
T_d	0,00269	2.12
T_f	0,002	2.13



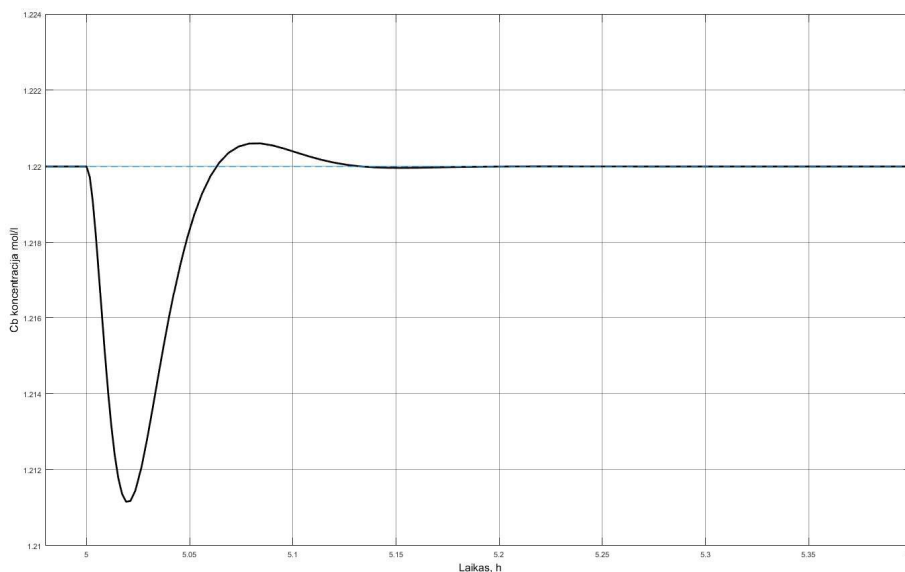
2.28 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,01905 [mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,0722 [h]$

IMC derinimo taisyklėmis valdymo sistemos reakcija į nuostato sekimą parodė, jog lyginant su Cohen ir Coon bei Ziegler ir Nichols derinimo metodais maksimali dinaminė nuokrypa bei reguliavimo trukmė sumažėjo daugiau nei dvigubai.

Taip pat, buvo išbandyta valdymo sistemos reakcija į trikdžio kompensavimą.



2.29 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių IMC derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

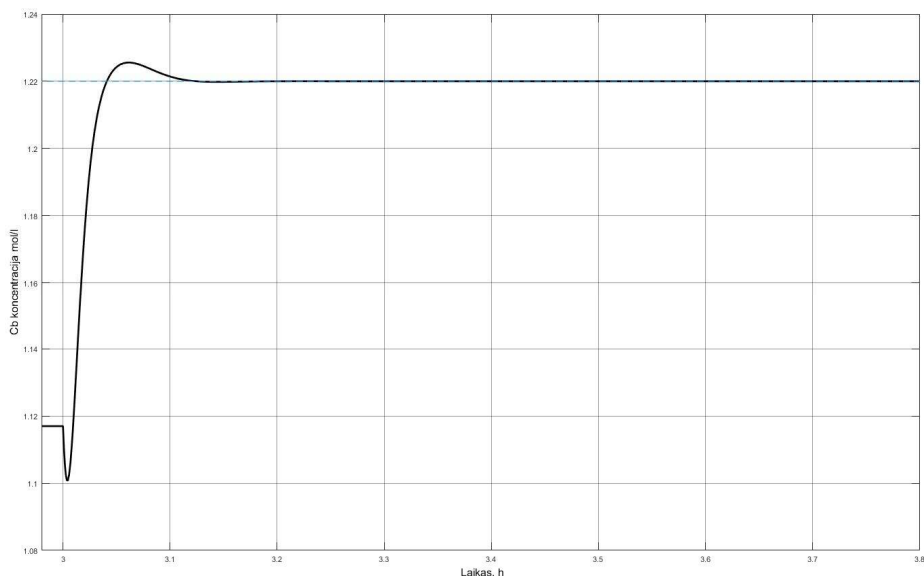
- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,0088[mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,0583[h]$

Vidinio modelio derinimo taisyklėmis suderinus reguliavimo kontūrą valdymo sistemos reakcija į trikdžio kompensavimą, maksimali dinaminė nuokrypa buvo panaši į dviejų prieš tai tirtų derinimo taisyklių reakcijos kreivės nuokrypas, o reguliavimo trukmė gauta panaši į Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis gautą reguliavimo trukmę.

Taip pat, ištirtos ir ITAE nuostato sekimo bei trikdžio kompensavimo derinimo taisyklės tiriamai valdymo sistemai.

2.12 lentelė ITAE nuostato reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	102,1337	2.14
T_i	0,0126	2.15
T_d	0,0025	2.16



2.30 pav. Valdymo sistemos reakcija sekant nuostatą, suderinus reguliatorių ITAE nuostatui skirtomis derinimo taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

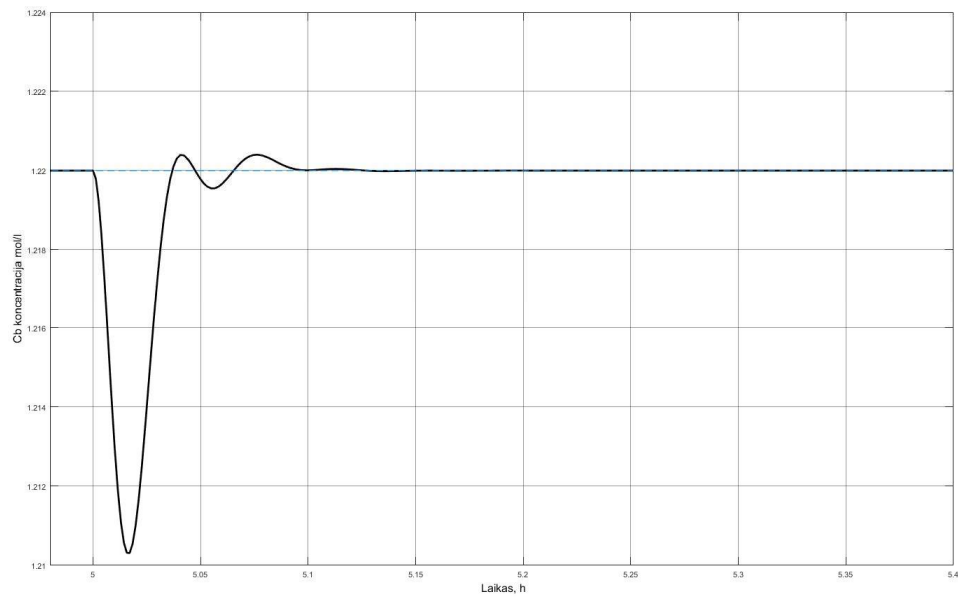
- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,00556[mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,1119[h]$

ITAE nuostato derinimo taisyklėmis, atsižvelgiant į kokybės rodiklius, suderinus reguliavimo kontūrą, buvo gauti geriausi rezultatai valdymo sistemai sekant nuostatą. Maksimali dinaminė nuokrypa ženkliai mažesnė už prieš tai tirtų derinimo metodų, o reguliavimo trukmė gauta šiek tiek didesnė nei IMC derinimo taisyklėmis.

Taip pat, iširta valdymo sistemos reakcija į trikdančio poveikio kompensavimą. Trikdžio kompensavimo derinimo taisyklių parametrai nurodyti 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė ITAE trikdžio reguliatoriaus derinimo taisyklių parametrai

Derinimo parametrai	Gauti rezultatai	Naudota formulė
K_r	143.948	2.17
T_i	0,0096	2.18
T_d	0,003	2.19



2.31 pav. Valdymo sistemos reakcija kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių ITAE trikdžio taisyklėmis

Kokybės rodikliai:

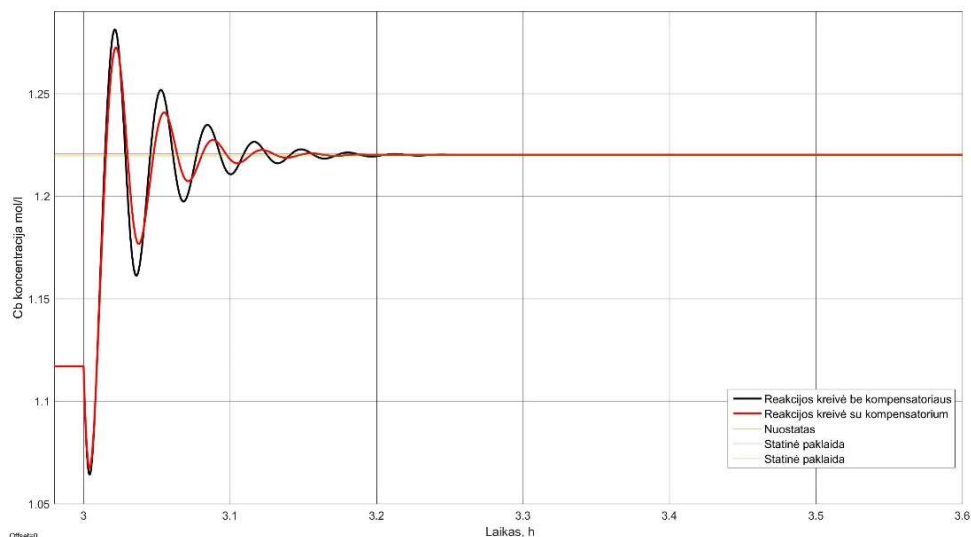
- maksimali dinaminė nuokrypa $x_1 = 0,00968[mol\ l^{-1}]$
- reguliavimo trukmė $t_r = 0,0348[h]$

ITAE trikdžio kompensavimo taisyklėmis suderinus reguliavimo kontūrą, buvo gauta didžiausia, iš visų keturių derinimo metodų, maksimali dinaminė nuokrypa, tačiau trumpiausia reguliavimo trukmė.

3. Valdymo sistemų palyginimas

Norint kokybiškai ir adekvačiai palyginti dvi valdymo sistemas, siekiančias valdyti atvirkštinės reakcijos procesą, palyginti tų pačių metodų rezultatai, bei pateiktos procentinės išraiškos, kaip pasikeitė rezultatai.

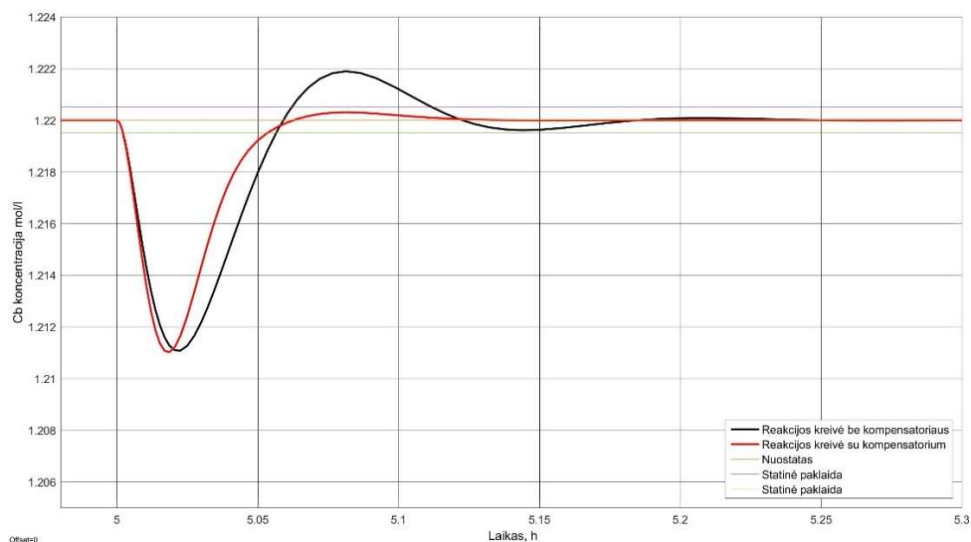
3.1 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją sekant nuostatą, suderinus reguliatorių pagal Cohen ir Coon derinimo taisykles.



3.1 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, sumažėjo 19,8 %. Reguliavimo trukmė sutrumpėjo 25,8 %.

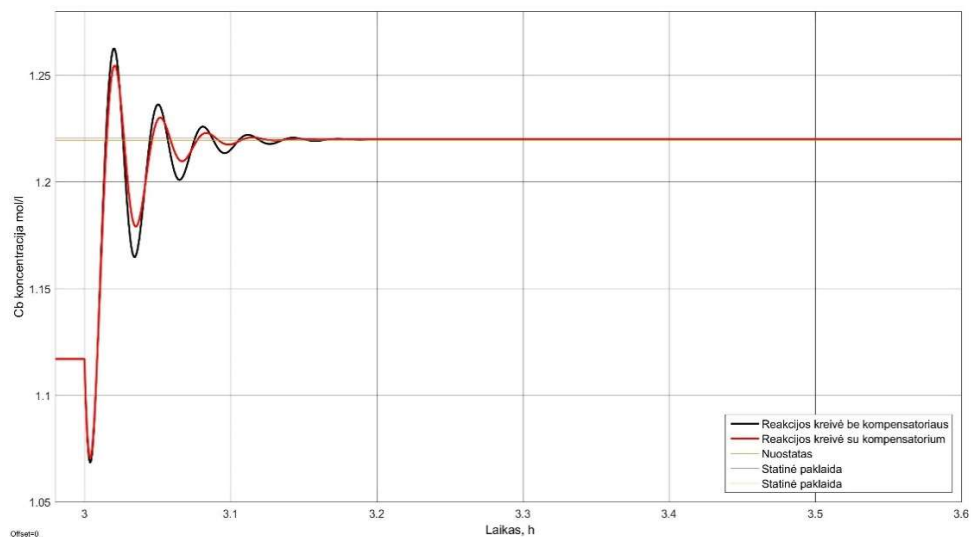
3.2 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją kompensuojant trikdantį poveikį, suderinus reguliatorių pagal Cohen ir Coon derinimo taisykles.



3.2 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį Cohen ir Coon derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, gauta praktiškai identiška valdymo sistemai be kompensatoriaus. Tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėjo beveik dvigubai – 46,4 %.

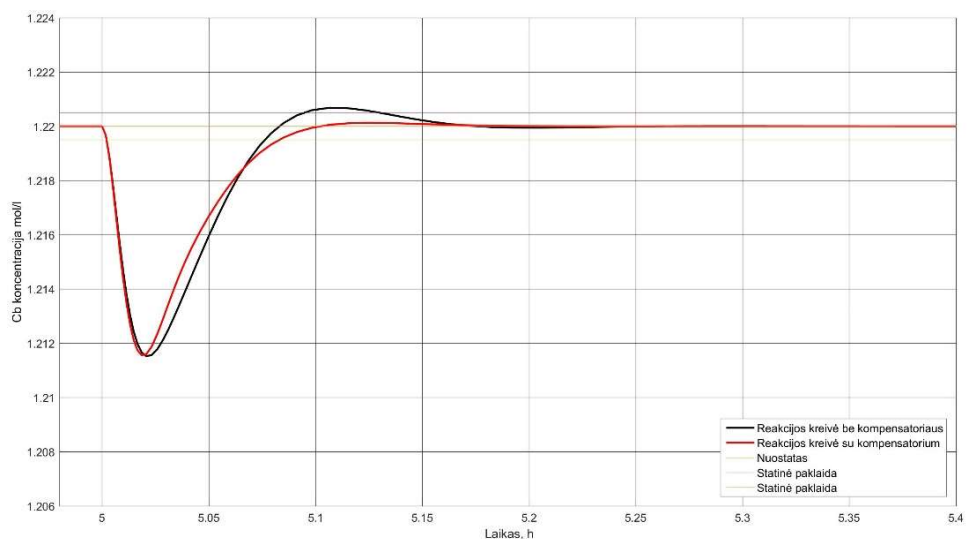
3.3 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją sekant nuostatą, suderinus reguliatorių pagal Ziegler ir Nichols derinimo taisykles.



3.3 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą, Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, sumažėjo 34,5 %. Reguliavimo trukmė sutrumpėjo 26,7 %.

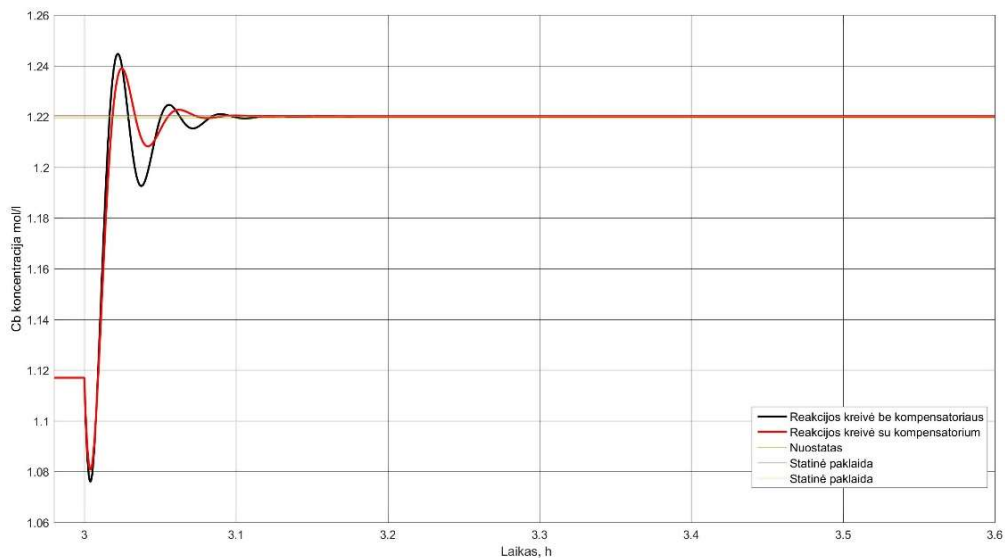
3.4 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją kompensuojant trikdį, suderinus reguliatorių pagal Ziegler ir Nichols derinimo taisykles.



3.4 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį, Ziegler ir Nichols derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, gauta praktiškai identiška valdymo sistemai be kompensatoriaus – sumažėjo tik 1 %. Tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėjo ženkliai – 36 %.

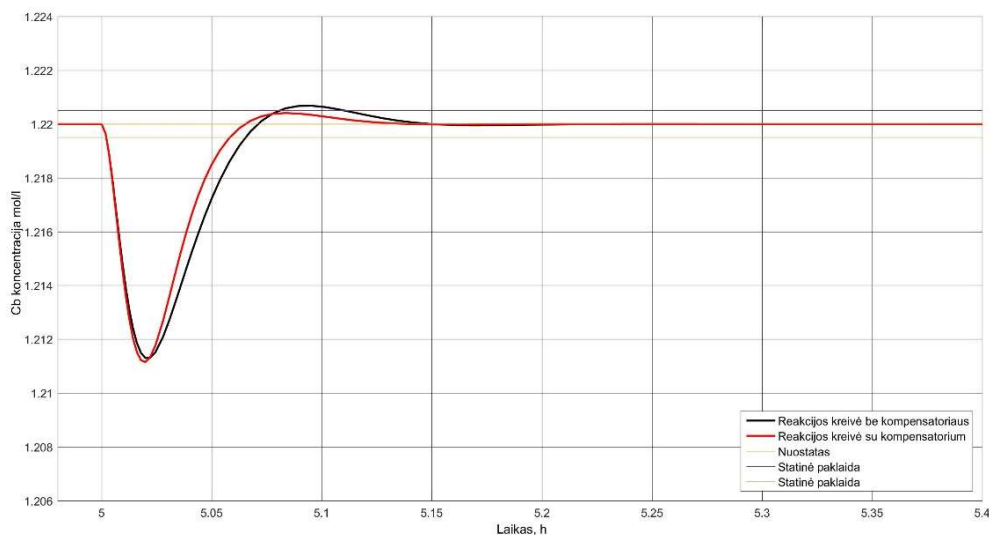
3.5 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją sekant nuostatą, suderinus reguliatorių pagal IMC derinimo taisykles.



3.5 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą, IMC derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, sumažėjo 30,7 %. Reguliavimo trukmė sutrumpėjo 35 %.

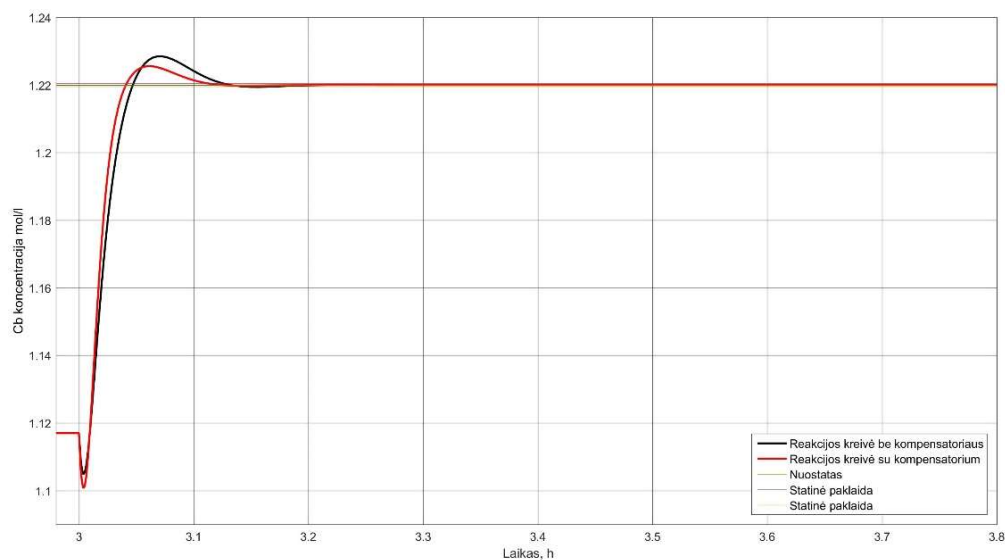
3.6 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją kompensuojant trikdį, suderinus reguliatorių pagal IMC derinimo taisykles.



3.6 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį, IMC derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, gauta praktiškai identiška valdymo sistemai be kompensatoriaus – sumažėjo tik 1,3 %. Tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėjo daugiau nei dvigubai – 53,7 %.

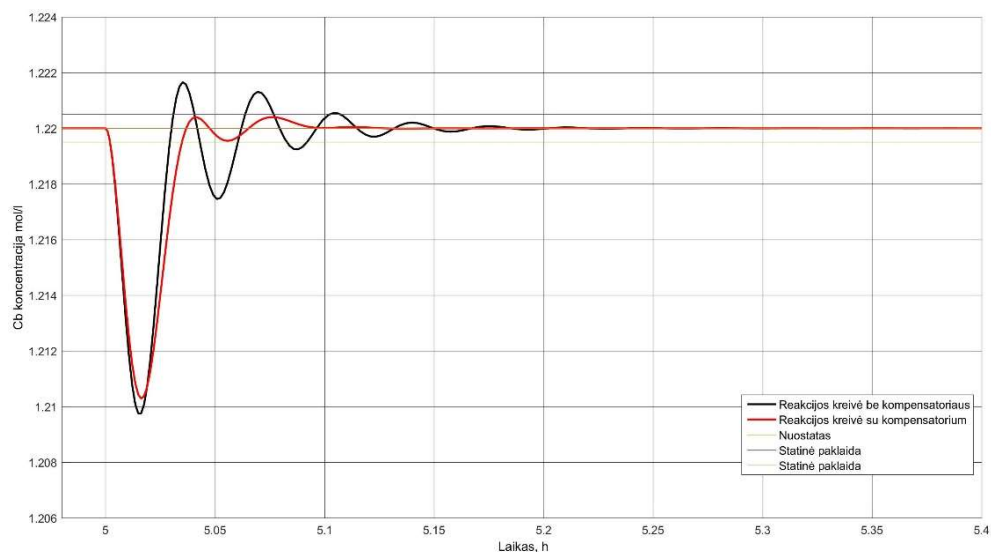
3.7 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją sekant nuostatą, suderinus reguliatorių pagal ITAE nuostato derinimo taisykles.



3.7 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas sekant nuostatą ITAE nuostato derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, sumažėjo 31,3 %. Reguliavimo trukmė sutrumpėjo 11,9 %.

3.8 paveiksle galima matyti valdymo sistemų reakciją kompensuojant trikdį, suderinus reguliatorių pagal ITAE trikdžio derinimo taisykles.



3.8 pav. Valdymo sistemų kreivių palyginimas kompensuojant trikdį ITAE trikdžio derinimo taisyklėmis

Atsižvelgiant į reakcijos kreives ir gautas kokybės rodiklių skaitines vertes, apskaičiuota, jog maksimali dinaminė nuokrypa, valdymo sistemos su kompensatoriumi, gauta šiek tiek mažesnė nei valdymo sistemos be kompensatoriaus – sumažėjo 5,9 %. Tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėjo daugiau nei dvigubai – 67,6 %.

Išvados ir rezultatai

1. Darbe išanalizuotas atvirkščiosios reakcijos procesų valdymas bei paaiškinta, su kokiais problemomis susiduriama valdant šiuos procesus;
2. Detaliau išanalizuotas valdomas procesas – *Van de Vusse* reaktorius;
3. Plačiau apžvelgtos darbe tirtos valdymo sistemos;
4. Sugeneruoti imitaciniai dviejų valdymo sistemų modeliai – valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu ir valdymo sistemos su kompensavimo kontūru;
5. Remiantis 4 reguliavimo dėsniais ir kokybės rodikliais, sureguliuotos valdymo sistemos parodė, jog:
 - taikant tuos pačius reguliavimo dėsnius, kompensavimo valdymo sistema seka nuostatą su 19,8-34,5 % mažesne maksimalia dinamine nuokrypa bei procesas nusistovi 11,9-35 % greičiau nei valdymo sistemoje su grįžtamoju ryšiu;
 - taikant tuos pačius reguliavimo dėsnius, kompensavimo valdymo sistema eliminuoja trikdantį poveikį su 0-5,9% mažesne maksimalia dinamine nuokrypa bei procesas nusistovi 36-67,6% greičiau nei valdymo sistemoje su grįžtamoju ryšiu;
6. Kuriant atvirkščiosios reakcijos imitacinius valdymo sistemos modelius bei vėliau realizuojant regulatoriaus parametrus valdiklyje rekomenduojama taikyti kompensavimo kontūrą, kas ženkliai pagerina valdymo kokybę, atsižvelgiant tiek į dinamines nuokrypas, tiek į reguliavimo trukmę.

Literatūros sąrašas

1. Aleksa, V.; Galvanauskas, V. Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. Kaunas, 2008.
2. Inverse Response [interaktyvus]. 2013m. [žiūrėta 2019 05 12] Prieiga per internetą: <http://blog.opticontrols.com/archives/1049>
3. R. Simutis, Sistemų procesų modeliavimas ir identifikavimas, VPU leidykla, 2008 m
4. P.J. Daudey. Crystallization of ammonium sulfate. Berlynas, 2002m.
5. D. Levišauskas. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas. Vilnius, 2008.
6. Modelado de un reactor CSTR de Van de Vusse. [interaktyvus] 2017m. [žiūrėta 2019 05 12] Prieiga per internetą: <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/modelado-de-un-reactor-cstr-de-van-de-vusse/>
7. Gary L. Foutch. Reactor in process engineering. Oklahoma State University, 2017m.
8. Marco Mazzotti. Introduction to Chemical Engineering: Chemical Reaction Engineering. ETH Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2015m.
9. Antonio L. DeVera, Arvind Varma. Yield optimization for the Van de Vusse reaction. University of Notre Dame, 1978m.
10. S.Alcantara, C.Pedret. Analytical design for a Smith-type inverse-response compensator. American Control Conference, 2009m.
11. Girma S. Tewolde. Sensor and Network Technology for Intelligent Transportation Systems. Kettering University Flint, 2012m.
12. Inverse Response [interaktyvus]. 2016m. [žiūrėta 2019 05 12] Prieiga per internetą: <http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/inverse.html>
13. Processes with Inverse Response [interaktyvus]. 2015m. [žiūrėta 2019 05 12] Prieiga per internetą: <http://nptel.ac.in/courses/103103037/28>
14. G. A. Ridlehoover, and R. C. Seagrave. *Optimization of Van de Vusse Reaction Kinetics Using Semibatch Reactor Operation*. Ind. Eng. Chem. Fundamen., 1973
15. Duško Bikić, Branko Butinar, Peter Glavič. *Optimal reactor systems for Van de Vusse reaction scheme with multicomponent feed*. Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, University of Maribor, Smetanova, 2001m.
16. D. Karagiannis, Z.P. Jiang, R. Ortega, A. Astolf. Output-feedback stabilization of a class of uncertain non-minimum-phase nonlinear systems. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, London, 2005m.
17. Wai SanYip, Thomas E.Marlin. *Multiple data sets for model updating in real-time operations optimization*. Department of Chemical Engineering, McMaster University, Hamilton, Ont., Canada, 2002m.
18. Alejandro J.Rojas. Stabilizability of nonminimum phase unstable plants. Chile, 2007m.
19. Knut Graichen, Veit Hagenmeyer, Michael Zeitz. *Van de Vusse CSTR as a benchmark problem for nonlinear feedforward control design techniques*. Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Germany, 2017m.
20. Andrés Donoso-Bravo, Constanza Sadino Riquelme, Daniel Gómez, Camilo Segura, Emky Valdebenito, Felipe Hansen. *Modelling of an anaerobic plug-flow reactor. Process analysis and evaluation approaches with non-ideal mixing considerations*. INRIA Chile, Avenida Apoquindo, 2827, piso 12, Santiago de Chile, Chile, 2018m.