



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Redanas Odinas

**IŠTIRPUSIO DEGUONIES KONCENTRACIJOS PRAMONINIAME
AEROTANKE AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

prof. habil. dr. Donatas Levišauskas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**IŠTIRPUSIO DEGUONIES KONCENTRACIJOS PRAMONINIAME
AEROTANKE AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

(parašas) prof. habil. dr. Donatas Levišauskas
(data)

Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Redanas Odinas
(data)

KAUNAS, 2015

Odinas, R. Ištirpusio deguonies koncentracijos pramoniniame aerotanke automatinio valdymo sistemos tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2015. 44 psl.

SANTRAUKA

Sukurta valdymo sistema, skirta palaikyti ištirpusio deguonies koncentraciją pramoniniame aerotanke. Regulatoriaus adaptacijai prie kintamos proceso būsenos naudojamas stiprinimo numatymo algoritmas, kuriame kaip stiprinimo numatymo parametras naudojamas deguonies sunaudojimo greičio signalas. Įtekančio į aerotanką nuotekų srauto pokyčių įtakos kompensavimui naudojamas tiesioginio ryšio reguliatorius. Automatinio valdymo sistemos tyrimas atliktas imitacinio modeliavimo būdu Matlab/Simulink programinio paketo aplinkoje. Pateikti modeliavimo rezultatai, demonstruojantys sukurtos sistemos veikimo pranašumą lyginant su valdymo sistema, naudojančią PID reguliatorių su pastoviais parametrais.

Reikšminiai žodžiai :

Ištirpusio deguonies koncentracija, Stiprinimo numatymas, vandens valymo įrenginiai

Odin, Redan. Investigation of Automatic Control System of Dissolved Oxygen Concentration in Industrial Aerotank. Final project of *Master degree* / supervisor prof. habil. dr. Donatas Levišauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation.

Kaunas, 2015. 44 pages.

SUMMARY

The control system of dissolved oxygen concentration in industrial aerotank was developed. Controller adaption algorithm was developed to varying process dynamics using gain scheduling approach in which as scheduling variable is oxygen uptake rate signal. The feed-forward control algorithm was used to compensate wastewater inlet flow into aerotank. Automatic control system was investigated using Matlab/Simulink software. Investigated control system demonstrates better performance compared to static parameters PID controller.

Keywords:

dissolved oxygen concentration, gain scheduling, wastewater treatment process

Turinys

Įvadas.....	2
1 Apžvalginė dalis	3
1.1 Reguliatorių adaptacijos metodai.....	3
1.1.1 Automatinis derinimas.....	3
1.1.2 Stiprinimo numatymas.....	4
1.1.3 Adaptyvus valdymas	5
1.2 Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos	6
1.2.1 Neraiškios logikos PID algoritmo taikymas.....	6
2 Metodinė dalis	8
2.1 Technologinė nuotekų valymo proceso schema	8
2.2 Valdomo proceso modeliavimas.....	9
2.3 Valdomos sistemos principinė schema	10
2.4 Kappa-Tau derinimas.....	11
2.5 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus projektavimas	16
2.6 Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymas.....	19
2.7 Simuliacijos metu užduodami parametrai.....	20
3 Tyrimo rezultatų dalis.....	21
3.1 Stiprinimo numatymo algoritmo parametrų nustatymas	21
3.1.1 Dinaminių proceso charakteristikų nustatymas.....	21
3.1.2 Proceso reakcijos į šuolinius trikdžius modeliavimas	24
3.1.3 Stiprinimo numatymo metodu nustatytas PID reguliatoriaus parametrų rinkinys	27
3.2 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus parametrų nustatymas	30
3.3 Stiprinimo numatymo algoritmo ir PID reguliatoriaus su pastoviais parametrais tyrimas..	32
3.3.1 Stiprinimo numatymo algoritmo PID parametrų kitimas.....	34
3.4 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus ir PID reguliatoriaus tyrimas	37
3.5 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus ir stiprinimo numatymo algoritmo tyrimas.....	40
4 Išvados	43
5 Literatūra	44

Įvadas

Tikslus biologinio proceso parametrų identifikavimas turi didelės reikšmės valdymo kokybei, kuri yra glaudžiai susijusi su ekonominiu aspektu. Vienas iš tokių biologinių procesų yra nuotekų valymo procesas aktyviuoju dumblo. Nuotekų valymas turi būti atliktas iki nustatyto lygio, kad ekosistema galėtų saugiai absorbuoti nuotekas, tam reikalinga diegti didesnio masto ir sudėtingesnes nuotekų valyklas. Daugelis nuotekų valyklų naudoja vieną iš aktyvaus dumblo procesų, kuriuose natūraliai sutinkami mikroorganizmai auginami nuotekų vandenyje sąlygomis, kurios optimizuoja biologinių medžiagų suvartojimą. JAV nuotekų vandens valymo kaštai išaugo nuo 1 mlrd. dolerių 1950m. iki 16.7 mlrd. dolerių 1996m. [1]. Nuotekų valymo procese nuo 25 iki 60% proceso energijos sąnaudų skiriama aeracijos procesui [2]. Taigi aeracijos proceso optimizuotas valdymas yra pagrindinė problema šiame technologiniame procese. Valdymo kokybei pagerinti dažniausiai taikomas matematinis modelis paremtas valdymas. Šis metodas reikalauja geros kokybės modelių ir tikslaus modelio parametrų identifikavimo.

Tyrimo tikslas: sudaryti adaptyvią ištirpusio deguonies koncentracijos pramoniniame aerotanke automatinio valdymo sistemą, palaikančią ištirpusio deguonies koncentraciją, kintant proceso sąlygoms.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti adaptyvių reguliavimo metodų ir ištirpusio deguonies koncentracijos literatūros analizę.
2. Sudaryti ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemai stiprinimo numatymo algoritmą ir jį ištirti.
3. Sudaryti tiesioginio ryšio kompensatorių įtekančio nuotekų srauto trikdančiojo poveikio kompensavimui ir jį ištirti.

1 Apžvalginė dalis

1.1 Reguliatorių adaptacijos metodai

Daug dėmesio pastaruoju metu skiriama adaptacinės technikos vystymui ir tyrimams, kurie skirti adaptyvių reguliavimo metodų kūrimui ir tobulinimui. Tačiau pramonėje plačiausiai naudojami automatinis derinimas ir stiprinimo numatymas.

Norint parinkti adaptacijos metodą, būtina išsiaiškinti valdomos sistemos regulatoriaus kokybės reikalavimus. Jei reguliavimo kokybei nėra keliami aukšti reikalavimai, galima naudoti reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais. Jei reikalavimai aukštesni, būtina ieškoti kitų proceso valdymo sprendimų. Proceso dinamikai esant pastoviai naudojamas reguliatorius su pastoviais parametrais, kuriuos galima nustatyti automatiškai. Tačiau reguliuojant procesą, kurio dinamika keičiasi plačiose ribose, dinamikos pokyčius reikėtų įvertinti ir kompensuoti keičiant regulatoriaus parametrus. Jei dinaminiai pokyčiai gali būti nustatyti iš matavimų signalų, turėtų būti pasirinktas stiprinimo numatymo algoritmas, nes jis paprastesnis, ir sistema yra stabilesnė negu taikant nepertraukiamos adaptacijos metodą. Tipiškas dinamikos pokyčio pavyzdys yra valdymo kontūre sukelti netiesiški pokyčiai. Tokiu atveju sistemos sudarymo etape, galima sudaryti stiprinimo numatymo algoritmo priklausomybes.

Praktikoje dažnai proceso dinamikos nėra prognozuojamos. Dinamikos pokyčiai vyksta keičiantis žaliavos koncentracijoms, dėl įrenginių nusidėvėjimo ir kitų išorinių veiksnių. Tokie dinamikos pokyčiai negali būti kompensuojami stiprinimo numatymo algoritmu, šiems procesams tikslinga taikyti adaptaciją.

1.1.1 Automatinis derinimas

Kai yra nežinoma procesų dinamika, bet ji yra pastovi, taikomas automatinis derinimas. Metodus remiasi tuo, kad operatoriaus nurodymu reguliatorius suderinamas automatiškai. Šis derinimo būdas dar kitaip vadinamas vieno bandymo derinimu. Automatinis derinimas gali būti atliktas naudojantis išoriniais prietaisais, kurie derinimo metu įjungiami į valdymo kontūrą. Norint naudotis šiomis sistemomis būtina, kad sistema būtų suderinama su valdiklių struktūromis. Automatiškai derinime taikomi du skirtingi metodai: šuolinės reakcijos eksperimentas ir dažninės reakcijos eksperimentas.

Yra sukurta nemažai skirtingų PID automatiškai reguliatorių derinimo metodų, tačiau nepriklausomai nuo metodo tipo naudojama tokia procedūra:

1. Nusistovėjusio proceso įėjimo signalo reikšmė yra pakeičiama arba sugeneruojama automatiškai uždaro neigiamo grįžtamojo ryšio sistemoje
2. Proceso išėjimo signalas į įėjimo signalo pokytį yra analizuojamas sudarant tiesinį arba netiesinį proceso modelį
3. Remiantis proceso modeliu ir žinomais valdymo metodais identifikuojami reguliatoriaus parametrai.

Dauguma reguliatorių automatinių derinimų metodai remiasi šuolinės reakcijos eksperimentais. Norint suderinti reguliatorių yra atliekamas šuolinis eksperimentas. Eksperimento metu proceso negali veikti išoriniai trikdančieji poveikiai. Kai proceso operatorius nori suderinti reguliatorių, valdymo signalas yra šuoliškai pakeičiamas, ir valdiklis įrašo, kaip keičiasi proceso išėjimo signalas į šuolišką įėjimo signalo pokytį. Iš gautų eksperimento duomenų sudaromas proceso modelis, atitinkantis proceso stacionarias sąlygas, ir identifikuojami reguliatoriaus parametrai. Atliekant šuolinį eksperimentą svarbu parinkti tinkamą šuolio amplitudę. Proceso operatoriai atlikdami šuolinį eksperimentą siekia, kad trikdančiojo poveikio dydis būtų kuo mažesnis ir darytų minimalią įtaką procesui. Tačiau, norint lengviau identifikuoti proceso modelį, proceso įėjimą reikia paveikti didesniu trikdančiuoju poveikiu [3].

Dažninis reakcijos eksperimentas gali būti atliekamas Reliniu automatiniu derinimu. Derinimo metu reguliatorius laikinai atjungiamas, o reguliavimo kontūre prijungiama relė su histerezės charakteristika. Šis metodas nereikalauja žinių apie proceso modelį[4].

Relinis automatinis derinimas yra pranašesnis už šuolinės reakcijos metodą dėl atliekamo eksperimento uždaro kontūro sistemoje. Reliniu automatiniu derinimu reguliuojamas proceso parametras gali būti palaikomas nuostato aplinkoje, kai relinio elemento išėjimas yra mažas. Svyravimų amplitudė ir ribinis periodas reliniame automatiniame derinime įsigali automatiškai. Tuo tarpu žema relinio elemento išėjimo amplitudė palaiko sistemos stabilumą. Tačiau šis derinimo metodas negali būti taikomas procesuose, kuriuose nedideli svyravimai gali sukelti negrįžtamas proceso reakcijas[5].

1.1.2 Stiprinimo numatymas

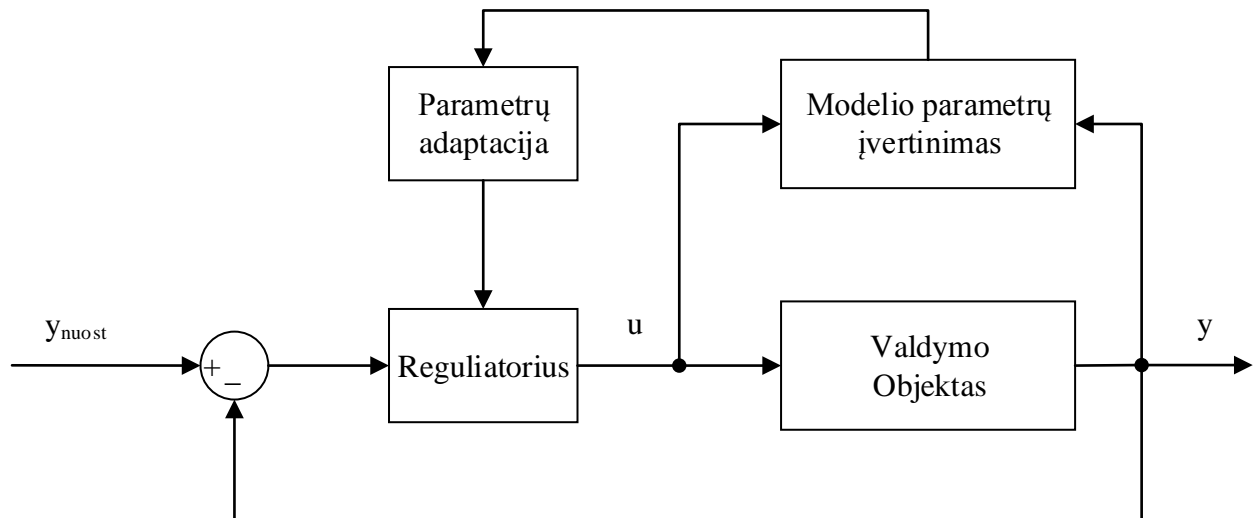
Stiprinimo numatymo algoritmas yra vienas populiariausių valdymo metodų ir yra plačiai taikomas įvairiose srityse, pradedant aeronautika - baigiant procesų valdymu. Tačiau yra didelė įvairovė valdymo algoritmų, kurie apibūdinami kaip stiprinimo numatymas (gain-scheduling). Sudėtingos netiesinės sistemos yra dalijamos į mažesnes tiesines sistemas. Šis skaldymo ir valdymo metodas

yra priežastis, dėl kurios stiprinimo numatymo metodas yra toks populiarus, nes įgalina žinomus tiesinius metodus naudoti sprendžiant netiesines problemas. Tipiniai reguliatoriai yra suderinti dirbti tam tikroje darbo taško aplinkoje, kurioje valdomas procesas yra tiesinis. Reguliatorius negali užtikrinti valdymo kokybės, o kai kada ir stabilumo, kai sistemos būseną nukrypsta nuo pusiausvyros taško. Norint išspręsti šią problemą reikia taikyti ištiesintą proceso dinamiką išilgai proceso būsenos trajektorijos. Dėl praktikoje retai žinomos proceso būsenų trajektorijos, sunku pagerinti reguliavimo kokybę. Netiesinių sistemų analizė ir projektavimas vis dar išlieka pakankamai sudėtingas, kai laike nekintančių sistemų algoritmai yra labiau išstobulinti. Naudojant stiprinimo numatymo valdymo metodą žymus reguliavimo kokybės pagerėjimas gali būti gaunamas, panaudojant keletą reguliatoriaus parametrų rinkinių.

1.1.3 Adaptyvus valdymas

Atsižvelgiant į procesų valdymo sistemų veikimą, visi procesai yra tiesiniai. Tačiau visi proceso kintamieji ir valdomi vožtuvai yra netiesiniai iki tam tikro laipsnio. Biologinio proceso atsakas į pokyčių valdiklio išėjime keičiasi dėl fermentacijos laiko, pirmuonių rūšies, bioreaktoriaus veiklos sąlygų. Sunkiai nusistovinėsios proceso reakcijos turi įtakos proceso reguliatoriaus parametrų nustatymui ir optimaliam valdymui [6]. Adaptyvus valdymas naudojamas netiesiniuose procesuose, kuriuose reguliatorius turi prisitaikyti prie kintančių proceso sąlygų. Derinant reguliatoriaus parametrus prie proceso dinamikos ir trikdančiųjų poveikiu pokyčių. Reguliatoriaus parametrų adaptacija gali būti atlikta tiesiogiai arba netiesiogiai įvertinant proceso parametrus. Netiesioginio derinimo sistema pateikta 1.1 pav., ji remiasi proceso modeliu. Modelio įvertinimo blokas įvertina proceso išėjimą y ir valdantįjį poveikį u . Parametrų adaptacijos blokas atitinkamai pagal įvertintą proceso modelį keičia reguliatoriaus parametrus. Tiesioginis metodas ieško požymių, kurie apibūdina svarbiausias sistemos savybes ir siekia surasti reguliatoriaus parametrų priklausomybes keičiantis procesui. Reguliatoriaus parametrai padėtų pasiekti reikiamą sistemos valdymo kokybę. Praktikoje sutinkami reguliatoriai su neraiškių (fuzzy) taisyklių sistema. Praktiniu patyrimu sukauptos žinios apie proceso dinamiką gali būti pritaikytos kuriant neraiškių taisyklių rinkinius procesui valdyti. Daugelis adaptacijos algoritmų yra pasyvūs ir laukia proceso nuostato pokyčių arba trikdančiųjų poveikių kitimo. Įvertinami sistemos parametrai ir pagal juos parenkamos derinimo taisyklės, reguliatoriaus parametrai, kurie palaiko sistemos valdymo kokybę. Adaptacija gali būti taikoma ir tiesioginio ryšio valdymui, dažniausiai naudojama trikdantiesiems poveikiams kompensuoti. Ši kompensavimo sistema efektyviai veikia tada, kai trikdžiai gali būti išmatuoti. Norint realizuoti tiesioginio ryšio kompensatorių, neužtenka vien išmatuoti trikdžio vertę – reikia

turėti ir adekvatų proceso modelį. Šią sistemą sunku suderinti, kai trikdantysis poveikis negali būti manipuluojamas ir, norint suderinti trikdžio kompensatorių, reikia sulaukti atitinkamo trikdančiojo poveikio.



1.1 pav. Adaptyvi netiesioginio derinimo sistema

1.2 Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos

Kadangi ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistema sprendžia ekonomines ir ekologines problemas, jai yra pateikta nemažai techninių sprendimų.

1.2.1 Neraiškios logikos PID algoritmo taikymas

Pastaraisiais metais gana dažnai netiesiniams ištirpusio deguonies koncentracijos procesams valdyti pasirenkamos adaptyvios valdymo sistemos.

Neraiškios logikos strategiją tikslinga taikyti, kai sprendžiami modeliavimo uždaviniai, kuriems būdinga neapibrėžta arba nepatikima informacija apie sistemos elgseną. Tačiau norint realizuoti tokią sistemą reikia gerai išmanyti patį procesą arba turėti eksperimentinių duomenų.

Neraiškios logikos (fuzy) valdymo teorija įgalina reguliatorių kūrimą iš proceso valdymo patirties, kurią proceso ekspertai yra sukaupę iš empirinių proceso stebėjimo duomenų. Neraiškios logikos algoritmas tapo svarbiu įrankiu kuriant skaičiavimais paremtas intelektualias nuotekų valymo sistemas. Pagrindinis šių sistemų privalumas tas, kad jos remiasi lingvistinėmis įėjimų-išėjimų taisyklėmis.

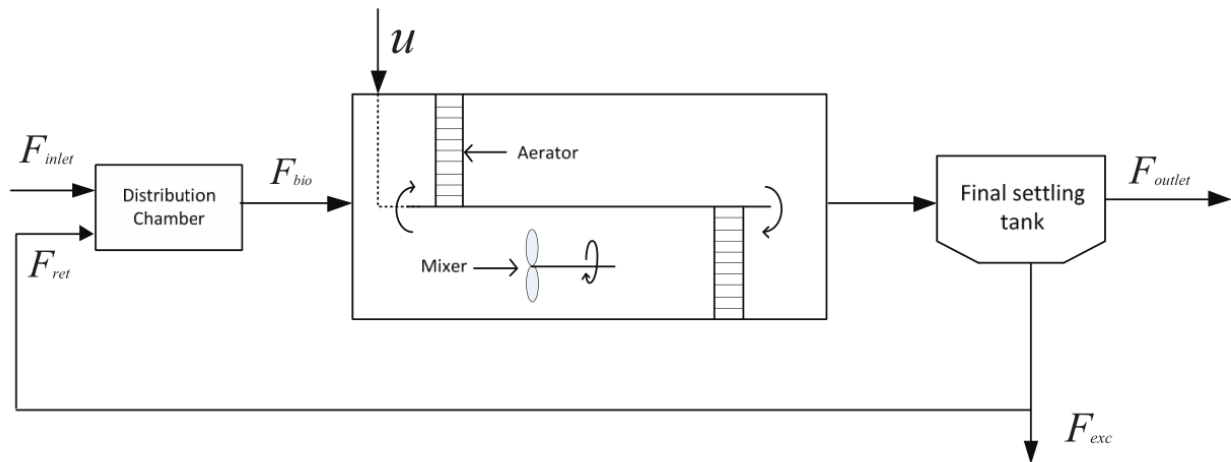
Ye Hong-Tao tiria ištirpusio deguonies aktyvaus dumblo nuotekų valymo sistemą. Procesui tirti sudaromas adaptyvus neraiškios logikos taisyklių rinkinys PID reguliatoriui. Adaptacijos algoritmas remiasi neraiškia logika ir derina reguliatoriaus parametrus, kol pasiekiami nustatytas kriterijus. Simuliacija atliekama proceso dinamika, modeliuojant antros eilės su vėlavimu perdavimo funkcija. Neraiškios logikos adaptacijos algoritmas pasiekia geresnę valdymo kokybę, lyginant su pastovių parametrų PID algoritmu. Sumažinami svyravimai ir sutrumpinamas nusistovėjusios reakcijos laikas [7].

Binh Lam Hoang tiria ištirpusio deguonies koncentracijos reguliavimą, naudodamas Hedge Algebraic valdymo metodą. Ištirpusio deguonies koncentracijos proceso modelis sudaromas antros eilės su vėlavimu perdavimo funkcija. Valdantysis poveikis yra orapūtės paduodamas srautas į sistemą. Sudaromi PI, neraiškių logikų (fuzzy) ir Hedge Algebraic reguliatorių valdymo algoritmai. Neraiškių logikų ir Hedge Algebraic reguliatorių algoritmai veikia pastebimai geriau už PI reguliatoriaus algoritmą. Neraiškių logikų kilimo laikas 98.1, nusistovėjimo laikas 143, perreguliavimas 0.75% . Hedge Algebraic kilimo laikas 83.4, nusistovėjimo laikas 104.3, perreguliavimas 0.5%. Iš tyrimo rezultatų matome, kad sudarytas Hedge Algebraic ištirpusio deguonies koncentracijos reguliavimo metodas yra pranašesnis už PI ir neraiškių logikų algoritmus [8].

2 Metodinė dalis

2.1 Technologinė nuotekų valymo proceso schema

Atitekančios nuotekos F_{inlet} prateka pro smulkias perforuotas grotas, smėliagaudes, pirminius radialinius nusodintuvus ir patenka į paskirstymo kamerą, kurioje sumaišomas su prieš tai atskirtomis nuosėdomis F_{ret} . Sumaišytos nuotekos su srautu F_{bio} patenka į aerotanką biologiniam išvalymui. Deguonis, reikalingas reakcijai vykti, yra paduodamas į aeratorių orapūtėmis. Maišyklė suteikia geriausią susimaišymą tarp bakterijų ląstelių ir maistingų medžiagų. Visuotinei deguonies difuzijai aeratoriuje reikalingas deguonis, kuris neleidžia susidaryti sąnašoms. Išgrynintas vanduo patenka į nusodintuvą, kuriame jis atskiriamas nuo mikroorganizmų. Biologinės nuosėdos iš nusodintuvo gražinamos atgal į aeratorių. Perteklinis dumblas pašalinamas su srautu F_{exc} .



2.1 pav. Technologinio proceso schema

Tipinį bioreaktoriaus su aeratoriumi veikimo principą sudaro biomedžiagos, kurios kartu su srautu F_{bio} patenka į bioreaktorių ir yra skaidomos biorganizmų. Kad reakcija vyktų sparčiai, ir biorganizmai efektyviai skaidytų biomedžiagas, būtina palaikyti nustatytą ištirpusio deguonies koncentracijos lygį [9].

2.2 Valdomo proceso modeliavimas

Valdomo proceso duomenys aproksimuojami tokia būsenos lygtimi

$$\frac{dc}{dt} = K_L \alpha \cdot (c^* - c) + (c_{in} - c) \frac{F_{bio}}{V} - OUR \quad (2.1)$$

$$K_L \alpha = \alpha \cdot u^\gamma \quad (2.2)$$

Čia c^* - ištirpusio deguonies koncentracija

$K_L \alpha$ - tūrinis deguonies pernešimo koeficientas iš dujinės būsenos į skystą būseną

α, γ - modelio parametrai

V - aerotanko tūris

u - oro srautas (valdantysis poveikis)

F_{bio} - Įtekančių nuotekų srautas

OUR - deguonies sunaudojimo greitis

c_{in} - ištirpusio deguonies koncentracija įtekančiose nuotekose

c - ištirpusio deguonies koncentracija (proceso būvio ir valdomasis kintamasis)

2.1 lentelė. Valdomo proceso parametrai

Modelio parametrų vertės		Pradinės proceso kintamųjų vertės
$c_{in} = 6 \text{ kg m}^{-3}$	$V = 3.31 \cdot 10^3 \text{ m}^3$	$c = 0.15 \text{ km m}^{-3}$
$c^* = 10 \text{ kg m}^{-3}$	$\alpha = 5.09$	$u_{set} = 1197 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
$T_{bm} = 3.33 \cdot 10^{-3} \text{ h}$	$\gamma = 0.138$	$OUR = 175 \text{ kg m}^3 \text{ h}^{-1}$
$T_e = 2.22 \cdot 10^{-2} \text{ h}$	$\tau = 0.1 \text{ h}$	$F_{bio} = 403 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

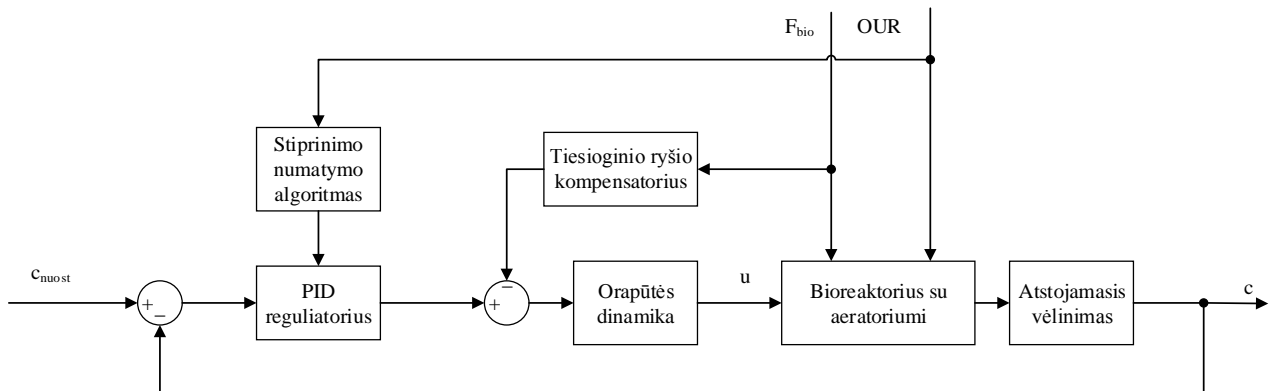
Valdomo proceso modeliavimo parametrai ir būsenos lygtis remiasi straipsnio duomenimis [9].

2.3 Valdamos sistemos principinė schema

Tiriamajame darbe bus remiamasi 2.2 pav. pateikta schema. Valdomas kintamasis yra ištirpusi deguonies koncentracija c_{nuost} . Šiai koncentracijai palaikyti naudosime kombinuotą valdymo sistemą, kuri sudaryta iš :

- Neigiamo grįžtamojo ryšio valdymo kontūro
- Tiesioginio ryšio valdymo (trikdžio kompensavimo) kontūro
- Stiprinimo numatymo (gain scheduling) algoritmo grįžtamojo ryšio regulatoriaus adaptacijos

Grįžtamojo ryšio sistema remiasi išmatuota išėjimo signalo c reikšme, pagal kurią apskaičiuojamas nuokrypis nuo užduotosios reikšmės c_{nuost} . Tačiau šis valdymo algoritmas veikia tik tuomet, kai proceso trikdantieji poveikiai yra paveikę proceso išėjimo vertę. Trikdžio kompensavimo kontūre bus kompensuojamas įtekantis srautas F_{bio} į aeratoriaus talpą. Šios valdymo sistemos privalumas yra tas, kad valdantysis poveikis yra pradamas formuoti prieš trikdančiajam poveikiui paveikiant proceso išėjimą. Adaptyvi valdiklio sistema realizuojama stiprinimo numatymo algoritmu, tiesiogiai įvertinant proceso trikdantįjį poveikį OUR ir adaptyviai keičiant valdiklio parametrus. Siekiama užtikrinti, jog regulatoriaus parametrai būtų adaptyviai keičiami, ir regulatorius dirbtų proceso būsenos darbo taške.



2.2 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema

2.4 Kappa-Tau derinimas

Kappa-Tau automatinio reguliavimo taisyklės naudojamos tada, kai reikia sekti nuostato pokyčius, ir kompensuoti trikdančiuosius poveikius. Šis metodas nuo kitų skiriasi tuo, kad nereikia perderinti regulatoriaus parametrų nuostatui sekti ir trikdančiajam poveikiui kompensuoti. Taip pat šio automatinio reguliavimo taisyklės nuo kitų skiriasi tuo, kad modifikuotam PID algoritmui sudarytam Kappa-Tau metodu nediferencijuojamas nuostato signalas[10]. Tai leidžia sumažinti triukšmo grįžtamajame kontūre įtaką regulatoriaus veikime.

Kappa-Tau automatinio reguliavimo sistemos derinimo metode naudojamas jautrumo matas – maksimalus jautrumas:

$$M_s = \max \left| \frac{1}{1 + W_{pr}(j\omega)W_r(j\omega)} \right| \quad (2.3)$$

Čia $W_{pr}(j\omega)$ - proceso perdavimo funkcija

$W_r(j\omega)$ - Regulatoriaus perdavimo funkcija

Maksimalus jautrumas yra santykis $\frac{1}{M_s}$, kuris atitinka trumpiausią atstumą tarp Nyquist diagramos ir kritinio taško. Tai parodo, kiek procesas gali keistis, nesukeldamas nestabilumo sistemai. Maksimalios jautrumo ribos svyruoja nuo $M_s = 1,4 \div 2,0$. Didesnės vertės naudojamos rečiau, nors jų greitaveika didesnė, tačiau yra mažiau tikslios.

Yra remiamasi dvejomis Kappa-Tau metodologijomis:

- Šuoline reakcijos kreivė
- Dažnine reakcijos kreivė

Abejose metodologijose naudojami išvestiniai proceso parametrai:

- Normuotas vėlavimas (τ) arba stiprinimo santykis(κ)
- Maksimalus jautrumas $M_s \leq M_{s,\max}$

Šie parametrai atspindi dinamines proceso savybes.

Šiame tiriamajame darbe naudojama šuolinės reakcijos metodas.

Šuolinės reakcijos metodas

Procesą apibūdinantys parametrai:

- Statinis stiprinimas K_{pr}
- Atstojamasis vėlavimas τ_{pr}
- Atstojamoji laiko pastovioji T_{pr}
- $\alpha = K_{pr}(\tau_{pr}/T_{pr})$

Derinimo parametrams nustatyti naudojamas modifikuotas PID algoritmas Kappa-Tau metodu

$$u(t) = \left[(by_{nuost} - y) + \frac{1}{T_i} \int (y_{nuost} - y) dt - T_d \frac{dy}{dt} \right] \quad (2.4)$$

Kadangi būsimą algoritmą būtų patogiau naudoti pramoniniuose įrenginiuose, jį pakeičiame pokyčių PID algoritmu.

Nuokrypių integravimą keičiame diskretinių matavimų suma:

$$I_n = I_{n-1} + T \cdot (y_{nuost} - y)(nT) \quad (2.5)$$

Diferencialinę dedamąją keičiame diskrečiųjų matavimo skirtumu:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y(nT) - y((n-1)T)}{T} \quad (2.6)$$

Įrašius (2.5) ir (2.6) lygtis į (2.4) lygtį gauname:

$$u(nT) = K_r \cdot \left[(by_{nuost} - y) + \frac{I_{n-1} + T \cdot (y_{nuost} - y)(nT)}{T_i} - \frac{T_d \cdot y(nT) - y((n-1)T)}{T} \cdot y \right] \quad (2.7)$$

Pažymėjus $u(nT) = u_n$, $y(nT) = y_n$ gauname:

$$u_n = K_r \cdot \left[(by_{nuost} - y_n) + \frac{I_{n-1} + T \cdot (y_{nuost} - y_n)}{T_i} - \frac{T_d \cdot (y_n - y_{n-1})}{T} \right] \quad (2.8)$$

Sugrupuojame narius y_{n-1} keičiamas į $y \cdot \frac{1}{z}$.

$$u_n = K_r \cdot \left[(by_{nuost} - y) + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) + \frac{I_{n-1}}{T_i} - \frac{T_d}{T} \cdot y + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right] \quad (2.9)$$

Valdančiojo signalo pokytis

$$\Delta u_n = u_n - u_{n-1} \quad (2.10)$$

$$u_{n-1} = K_r \cdot \left[(by_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} + \frac{I_{n-2}}{T_i} - \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right] \quad (2.11)$$

$$I_{n-1} = I_{n-2} + T \cdot (y_{nuost} - y) \quad (2.12)$$

Įrašius (2.09) ir (2.11) lygtis į (2.10) gaunama

$$\Delta u_n = K_r \cdot \left[(by_{nuost} - y) + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) + \frac{I_{n-1}}{T_i} - \frac{T_d}{T} \cdot y + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y - \left\{ (by_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} + \frac{I_{n-2}}{T_i} - \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right\} \right] \quad (2.13)$$

Atskliaudus (2.13) lygtį gaunama

$$\begin{aligned}
\Delta u_n = K_r \cdot & \left[(by_{nuost} - y) + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) + \frac{I_{n-2}}{T_i} + \frac{T}{T_i} \cdot \right. \\
& \cdot (y_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} - \frac{T_d}{T} \cdot y + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y - (by_{nuost} - y) \cdot \\
& \left. \cdot \frac{1}{z} - \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} - \frac{I_{n-2}}{T_i} + \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot y - \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Suprastinami (2.14) lygties nariai

$$\begin{aligned}
\Delta u_n = K_r \cdot & \left[(by_{nuost} - y) + \frac{T}{T_i} \cdot (y_{nuost} - y) - \frac{T_d}{T} \cdot y + \frac{2T_d}{T} \cdot \right. \\
& \left. \cdot \frac{1}{z} \cdot y - (by_{nuost} - y) \cdot \frac{1}{z} - \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right]
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Gaunamas PID pokyčių algoritmas, kuris bus naudojamas tolesniuose eksperimentuose

$$\begin{aligned}
\Delta u_n = K_r \cdot & \left[\left(b + \frac{T}{T_i} \right) \cdot y_{nuost} - \left(1 + \frac{T}{T_i} \right) \cdot y - \frac{T_d}{T} \cdot y + \frac{2T_d}{T} \cdot \right. \\
& \left. \cdot \frac{1}{z} \cdot y - \frac{1}{z} \cdot by_{nuost} + \frac{1}{z} \cdot y - \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{z} \cdot y \right]
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Čia $\frac{1}{z}$ - perstūmimo operatorius

2.2 lentelė. Aproximuojančios funkcijos parametrai

PID	M _s =2			
		a ₀	a ₁	a ₂
	αK _r	8.4	-9.6	9.8
	T _i /T _{pr}	0.28	3.8	-1.6
	T _d /T _{pr}	0.076	3.4	-1.1
	b	0.22	0.65	0.051

PID regulatoriaus parametrų nustatymui bus naudojami 2.2 lentelės aproksimuojančios funkcijos parametrai, kai maksimalus jautrumas $M_s=2$.

Norint taikyti Kappa-Tau metodą, paremtą šuoline reakcija, naudojama aproksimuojanti funkcija (2.17)

$$f(\tau) = a_0 \cdot \exp[a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2] \quad (2.17)$$

Remiantis 2.2 lentelės duomenimis ir aproksimuojančia funkcija sudaromos lygtis PID parametrams nustatyti.

$$K_r(t_k) = 8.4 \frac{T_{pr}(t_k)}{K_{\Delta C/\Delta u}(t_k) \tau_{pr}(t_k)} \exp[-9.6 \cdot \tau(t_k) + 9.8 \cdot \tau^2(t_k)] \cdot k_{kor} \quad (2.18)$$

$$T_i(t_k) = 0.28 \cdot T_{pr}(t_k) \cdot \exp[3.8 \cdot \tau(t_k) - 1.6 \cdot \tau^2(t_k)] \quad (2.19)$$

$$T_d(t_k) = 0.076 \cdot T_{pr}(t_k) \cdot \exp[3.4 \cdot \tau(t_k) - 1.1 \cdot \tau^2(t_k)] \quad (2.20)$$

$$b(t_k) = 0.22 \cdot \exp[0.65 \cdot \tau(t_k) + 0.051 \cdot \tau^2(t_k)] \quad (2.21)$$

$$\tau(t_k) = \frac{\tau_{pr}(t_k)}{\tau_{pr}(t_k) + T_{pr}(t_k)} \quad (2.22)$$

Kadangi proceso atstojamosios vėlavimo trukmės ir atstojamosios laiko pastoviosios santykis $\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} = 1.6$. Suderinus reguliatorių pagal Kappa-Tau derinimo taisykles, gaunamas perreguliavimas. Siekiant sumažinti perreguliavimą ir padidinti sistemos stabilumą, į regulatoriaus stiprinimo koeficiento skaičiavimo lygtį (2.18) įvedamas korekcijos koeficientas k_{kor} . Korekcijos koeficientas nustatomas imitacinio modeliavimo būdu, aproksimuojant rezultatus antro laipsnio polinomu. Gaunama koeficiento priklausomybė nuo deguonies sunaudojimo greičio. Rezultatai pateikti 3.8 pav.

2.5 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus projektavimas

Tiesioginio ryšio valdymas yra efektyvus būdas valdant proceso trikdančiuosius poveikius. Kai trikdantysis poveikis yra matuojamas, sudaromas valdantysis poveikis, kuris kompensuoja trikdantįjį poveikį prieš jam paveikiant proceso išėjimą. Tiesioginio ryšio kompensatorius projektuojamas, sudarant valdomo ir trikdančiojo poveikio pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijas.

Tiesioginio ryšio kompensatoriaus metodas negali būti realizuotas tada, kai trikdančiojo poveikio atstojamoji vėlavimo trukmė yra didesnė už proceso atstojamąją vėlavimo trukmę $\tau_d > \tau_{pr}$. [11]

Šiame darbe projektuojamas tiesioginio ryšio kompensatorius į aerotanką įtekančių nuotekų srauto kompensavimui.

Proceso perdavimo funkcija aproksimuojama pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos modeliu:

$$W_{pr}(s) = \frac{K_{pr}e^{-\tau_{pr}s}}{T_{pr}s + 1} \quad (2.23)$$

Trikdančio poveikio perdavimo funkcija aproksimuojama pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos modeliu:

$$W_d(s) = \frac{K_d e^{-\tau_d s}}{T_d s + 1} \quad (2.24)$$

Kompensavimo grandies perdavimo funkcija:

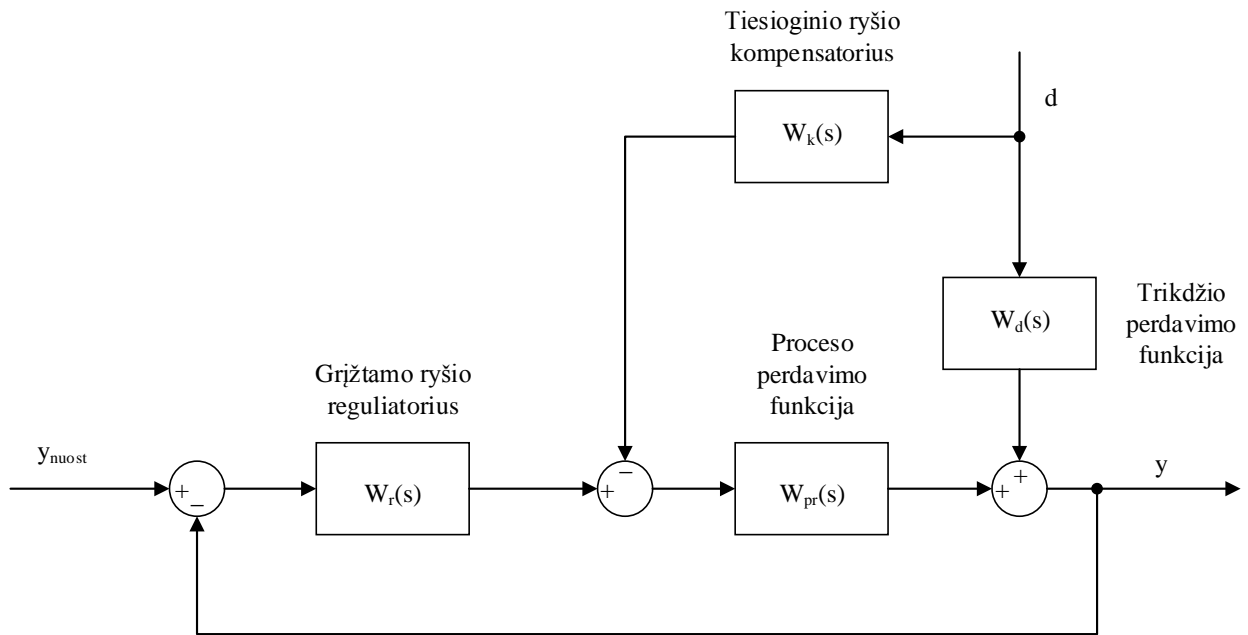
$$W_k(s) = \frac{W_d(s)}{W_{pr}(s)} = \frac{K_d e^{-\tau_d s}}{T_d s + 1} \frac{T_{pr}s + 1}{K_{pr} e^{-\tau_{pr}s}} = K_k \frac{T_{pr}s + 1}{T_d s + 1} e^{-\tau_k s} \quad (2.25)$$

Spartinimo vėlinimo elemento su laiko vėlinimu perdavimo funkcija, kuria galima gerai aproksimuoti tikslią kompensavimo grandies perdavimo funkciją. Jeigu $\tau_{pr} \approx \tau_d$ gaunamas tikslus spartinimo vėlinimo elementas. Spartinimo vėlinimo elementai gali būti realizuojami tiek analoginiu, tiek skaitmeniniu būdu valdymo sistemose.

Spartinimo-vėlinimo elementų derinimo procedūra:

1. Iš proceso reakcijos kreivių nustatomi dinaminiai proceso parametrai:
 - šuoliškai pakeitus proceso įėjimą, kai trikdantysis poveikis pastovus ($u=\text{var}$, $d=\text{const}$). Iš proceso reakcijos kreivių identifikuojami stiprinimo koeficientas, atstojamoji laiko pastovioji ir atstojamasis vėlavimo laikas $K_{pr}, T_{pr}, \tau_{pr}$.
 - šuoliškai pakeitus proceso trikdantįjį poveikį, kai proceso įėjimas pastovus ($u=\text{const}$, $d=\text{var}$). Iš proceso reakcijos kreivių identifikuojami stiprinimo koeficientas, atstojamoji laiko pastovioji ir atstojamasis vėlavimo laikas K_d, T_d, τ_d .
2. Nustatomi spartinimo vėlinimo grandies parametrai:
 - Stiprinimo koeficientas $K_k = K_d/K_{pr}$
 - Spartinimo laiko pastovioji T_{pr}
 - Vėlinimo laiko pastovioji T_d
 - Vėlinimo laikas $\tau_k = \tau_d - \tau_{pr}$

Tiesioginio ryšio reguliavimo sistemos, kurios paremtos grįžtamoju ryšiu, yra sunkiai įgyvendinamos dėl reikalingų labai tikslių proceso modelių. Šios sistemos praktiškai gerai kompensuoja trikdantįjį poveikį prieš jam paveikiant proceso išėjimą. Tiesioginio ryšio regulatorius kompensuoja pagrindinius greitai besikeičiančius trikdžius. O grįžtamojo ryšio reguliavimo kontūras kompensuoja tiesioginio ryšio valdymo netikslumus ir nematuojamus trikdančiuosius poveikius.



2.3 pav. Tiesioginio ryšio kompensatoriaus grįžtamo ryšio valdymo sistemoje struktūra

2.3 pav. pateiktos sistemos uždaro kontūro perdavimo funkcija:

$$y = \frac{W_r(s)W_{pr}(s)}{1 + W_r(s)W_{pr}(s)} y_{nuost} + \frac{W_d(s) + W_k(s)W_{pr}(s)}{1 + W_r(s)W_{pr}(s)} d \quad (2.26)$$

Parinkus kompensavimo grandį, jog tenkintų šią (2.7) sąlygą, trikdžio poveikis teoriškai panaikinamas proceso išėjimui y .

$$W_k(s) = \frac{W_d(s)}{W_{pr}(s)} \quad (2.27)$$

Tiesioginio ryšio kompensavimo kontūras uždaro sistemos stabilumui įtakos neturi. Jei trikdančiojo poveikio bei proceso funkcijos yra gerai žinomi, realizuojamas efektyvus kompensavimas. Kada proceso modelis nėra žinomas, arba trikdančiojo poveikio matavimai nėra pakankamai tikslūs, proceso išėjimo nuokrypius uždaroje sistemoje kompensuoja grįžtamojo ryšio kontūras.

2.6 Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymas

Norint sudaryti stiprinimo numatymo algoritmą, reikia nustatyti lokalius tiesinio reguliatoriaus parametrus, kurie yra optimalūs proceso atskirose būsenų taškų aplinkose. Iš gautų optimalių proceso reguliatoriaus derinimo parametrų interpoliuojant sudaromas globalinis reguliatorius, kuris, atsižvelgdamas į proceso būseną, automatiškai koreguoja reguliatoriaus derinimo parametrus. Regulatoriaus struktūrinė schema pateikta 2.4pav. Stacionarios būsenos nustatymui naudojamas proceso kintamasis, kuris yra matuojamas realiu laiku. Šiame darbe matuojamas deguonies sunaudojimo greitis OUR. Šis kintamasis turi atspindėti proceso būsenos dinaminis valdomo proceso pokyčius.

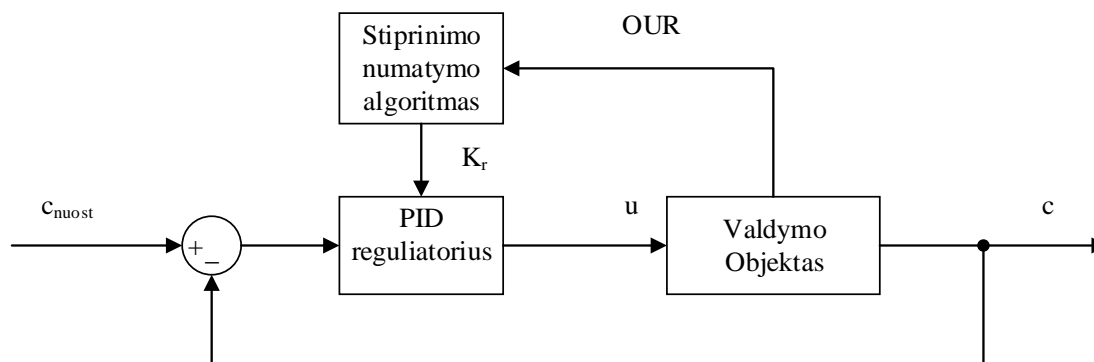
Ištiesinus procesą pusiausvyros taškų aplinkoje i -tajam pusiausvyros taškui užrašoma perdavimo funkcija(2.28).

$$W_i(s) = \frac{\Delta Y_i(s)}{\Delta U_i(s)} = \mathbf{C}(OUR_i)[s\mathbf{I} - \mathbf{A}(OUR_i)]^{-1}\mathbf{B}(OUR_i), \quad i=1, \dots, 13 \quad (2.28)$$

Remiantis (2.28) perdavimo funkcija, keičiantis deguonies sunaudojimo greičiui OUR, sudaroma 13 PID reguliatoriaus parametrų rinkinių. $K_r(OUR_i)$, $T_i(OUR_i)$, $T_d(OUR_i)$, $b_i(OUR_i)$, $i= 1, \dots, 13$.

Nepertraukiamai matuojant deguonies sunaudojimo greitį OUR galima tiesiogiai adaptuoti reguliatoriaus derinimo parametrus. Proceso būseną identifikuojantis parametras OUR kinta proceso būsenos taškų diapazone $OUR_{\min,i} < OUR \leq OUR_{\max,i}$, $i= 1, \dots, 13$ naudojamas projektuojant reguliatorių [12]. Regulatoriaus parametrai nustatomi pagal (2.29) formules.

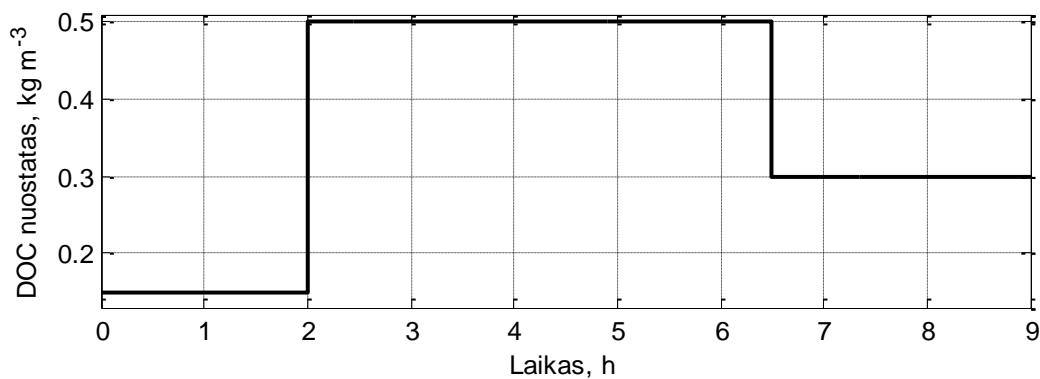
$$K_r(t_k)=K_r(OUR_i), T_i(t_k)= T_i(OUR_i), T_d(t_k)= T_d(OUR_i), b_i(t_k)= b_i(OUR_i) \quad (2.29)$$



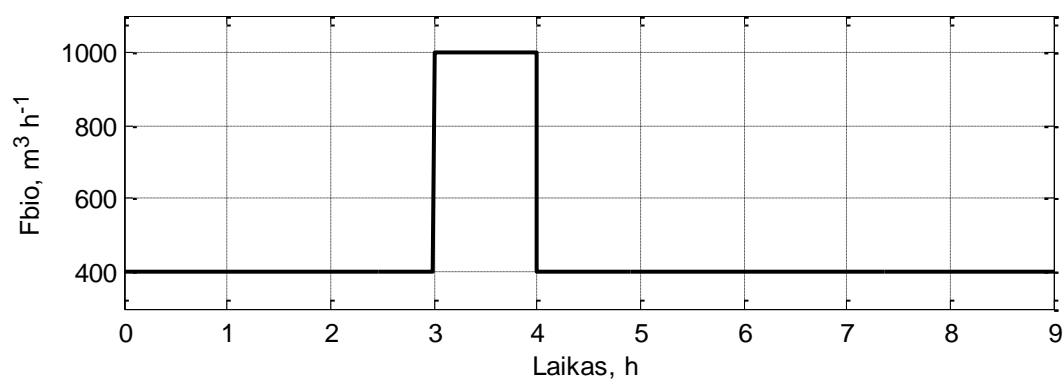
2.4 pav. Stiprinimo numatymo algoritmo struktūra

2.7 Simuliacijos metu užduodami parametrai

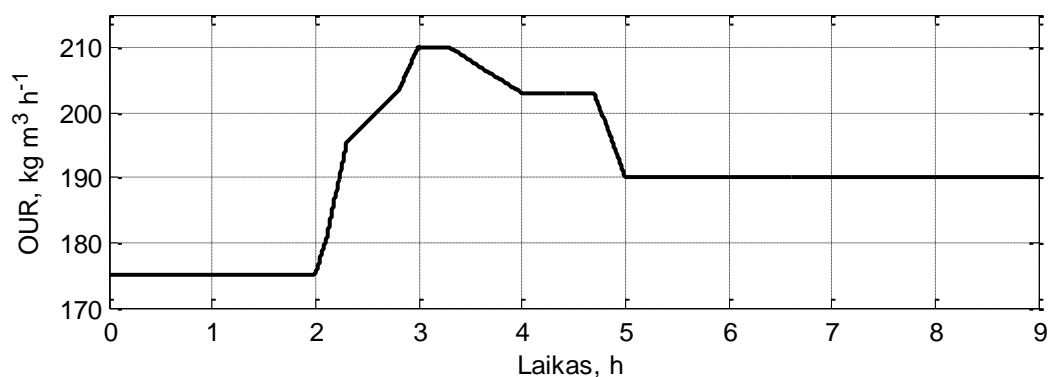
Proceso simuliacija atliekama Matlab programinio paketo simulink aplinkoje. Simuliacijos metu užduodami kintami nuostato ir trikdžių parametrai pateikiami 2.5-2.7 pav.



2.5 pav. Nuostato kitimo laiko grafikas



2.6 pav. Įtekančio srauto kitimo laiko grafikas



2.7 pav. Deguonies sunaudojimo greičio kitimo laiko grafikas

3 Tyrimo rezultatų dalis

Taikant Kappa-Tau metodą nustatomi lokalūs tiesinio reguliatoriaus derinimo parametrai atskirose valdymo procesų taškų aplinkose. Interpoliuojami lokalinių reguliatorių parametrai, sudaromos reguliatoriaus stacionarių būsenų kreivės, kurios, kintant proceso darbo taškui, keičia reguliatoriaus parametrus. Šiame tyrime nagrinėjamas atvejis, kai kinta deguonies sunaudojimo greitis OUR, ieškoma optimalių reguliatorių parametru.

3.1 Stiprinimo numatymo algoritmo parametru nustatymas

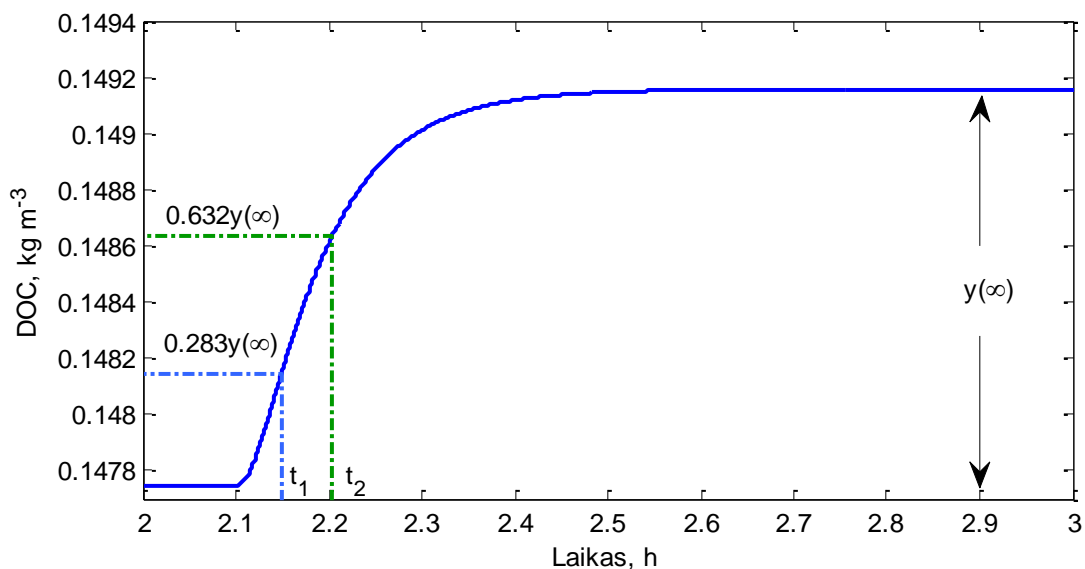
Norint sudaryti stiprinimo numatymo (gain scheduling) algoritma reikia:

- Identifikuoti reguliatoriaus derinimo parametrus proceso būsenų taškuose
- Interpoliuoti gautus reguliatoriaus derinimo parametrus

Reguliatoriaus derinimo parametru identifikacija gaunama, remiantis šuolinės reakcijos kreivės metodu. Gauti reguliatorių derinimo parametrai interpoliuojami antros eilės polinomu.

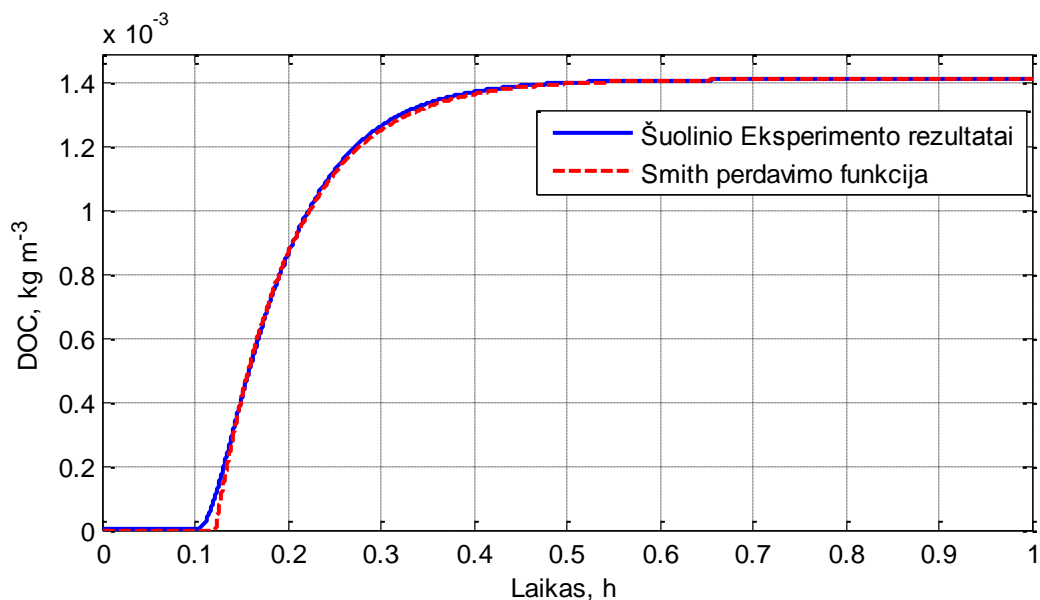
3.1.1 Dinaminių proceso charakteristikų nustatymas

Dinaminiai proceso parametrai nustatomi remiantis C.L.Smith grafiniu metodu. 3.1 pav. pateiktas grafikas, kuriame pateikta proceso šuolinės reakcijos kreivė. Randami laikai t_1 , t_2 , iš kurių nustatomos: atstojamojo laiko pastovioji ir atstojamoji vėlavimo trukmė.

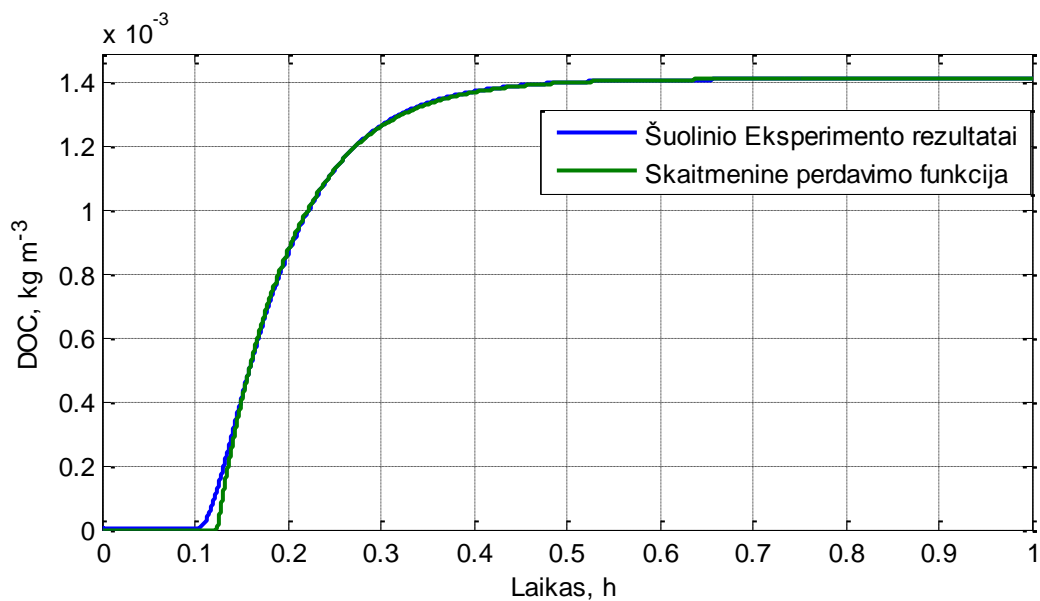


3.1 pav. Smith'o metodas pirmos eilės su vėlavimu modelio parametru nustatymui

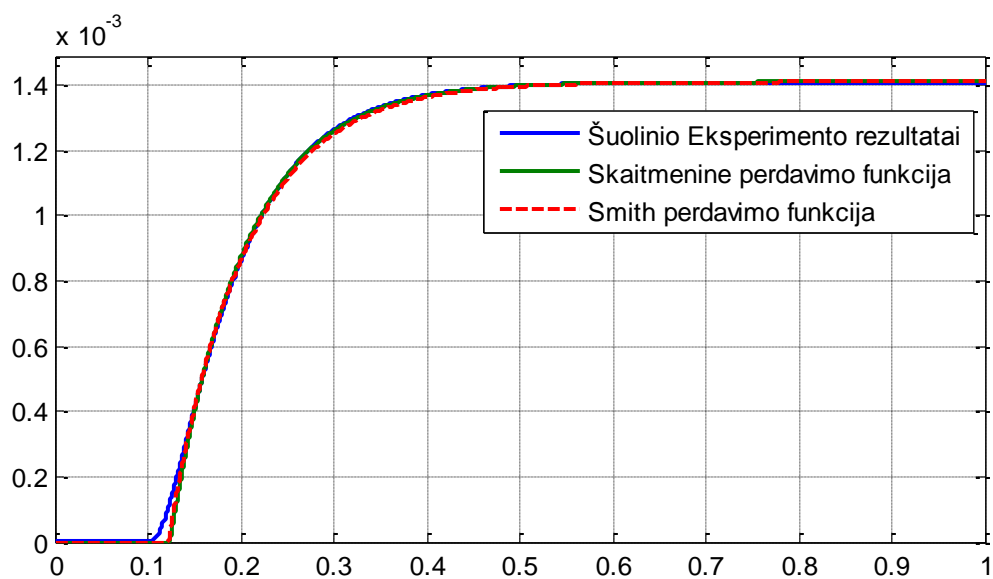
Norint įsitikinti parametų tikslumu sudaroma pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija, kuri palyginama su proceso šuolinės reakcijos kreive.



3.2 pav. Valdomo proceso reakcijos kreivė ir jos aproksimacijos pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija Smith'o metodu



3.3 pav. Valdomo proceso reakcijos kreivė ir jos aproksimacijos pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcija skaitmeniniu metodu

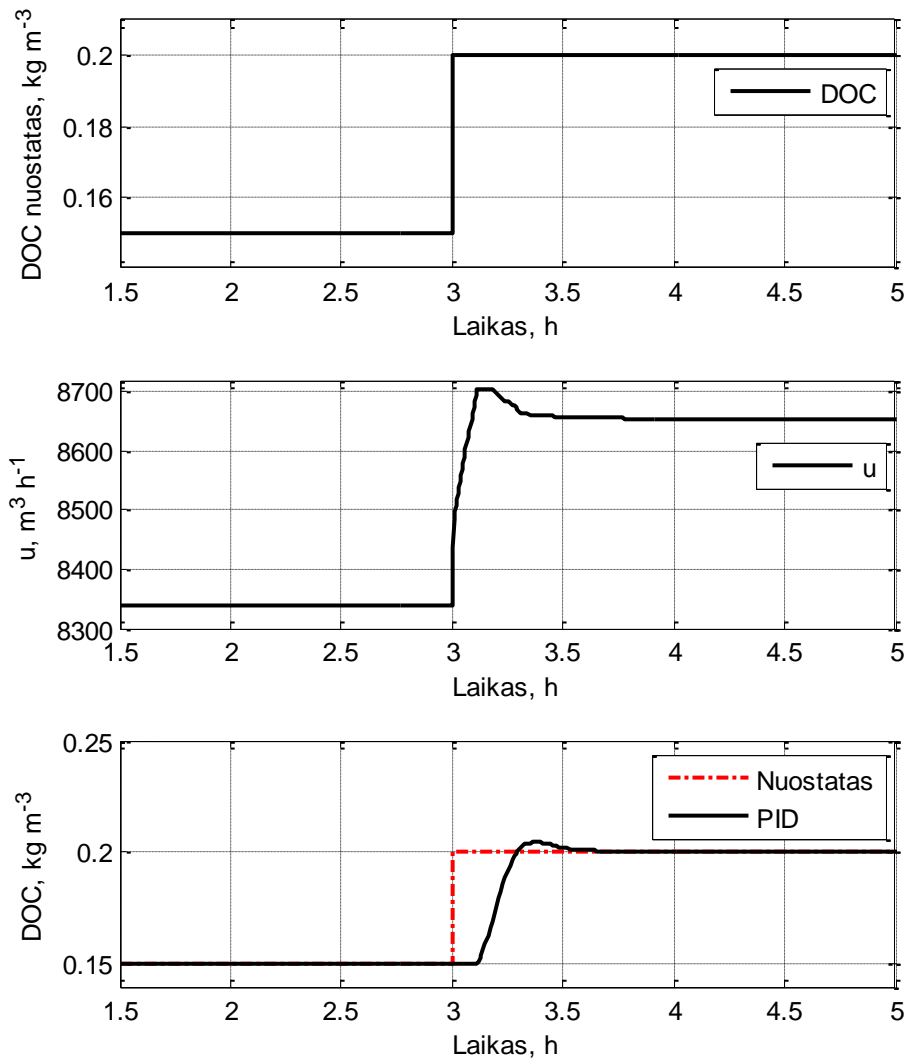


3.4 pav. Valdomo proceso reakcijos kreivė ir jos aproksimacijos pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijomis naudojant skirtingus aproksimacijos metodus

Palyginus proceso šuolinės reakcijos kreivę ir identifikuotas kreives Smith'o ir skaitmeniniais metodais 3.4pav. nepastebima žymesnio skirtumo tarp metodų tikslumo, todėl tolimesniam tyrimui atlikti bus naudojamas Smith'o metodas.

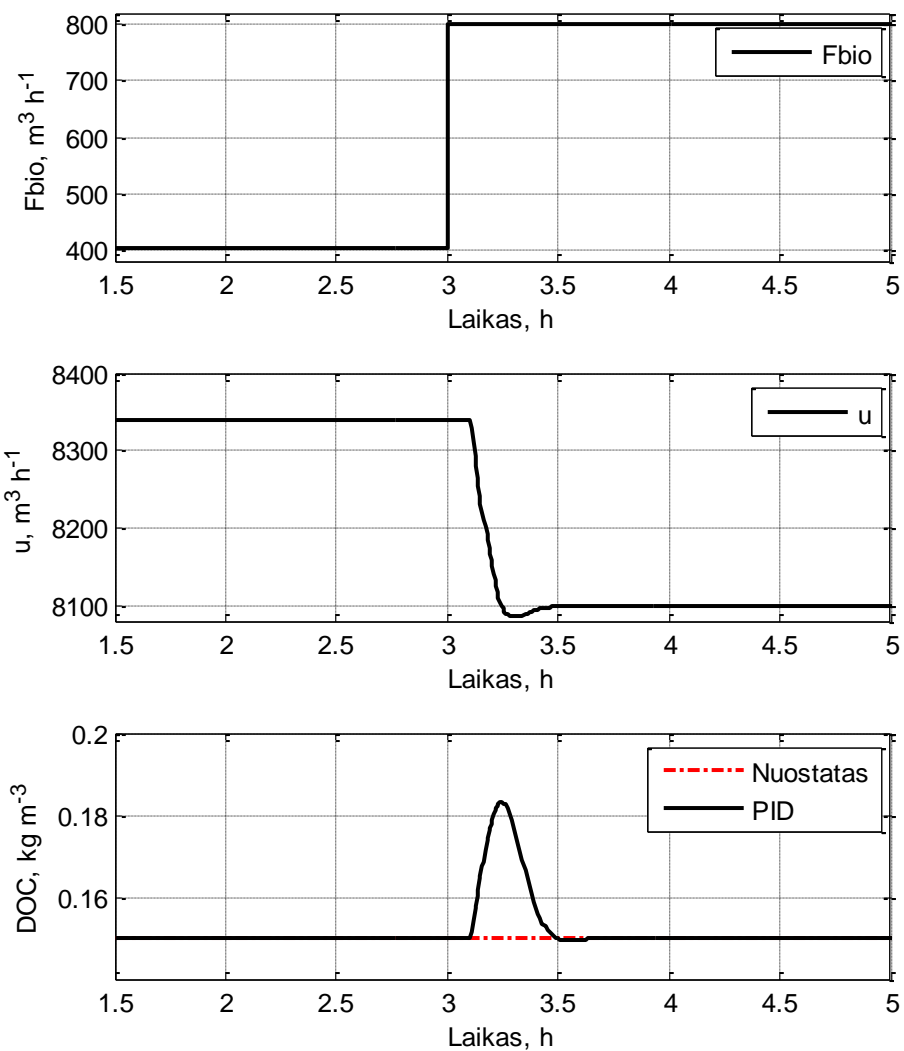
3.1.2 Proceso reakcijos į šuolinius trikdžius modeliavimas

Norint patikrinti, ar sistema yra adekvačiai sumodeliuota, ir sudaryti PID algoritmai ir jų parametrai gerai veikia, atliekami šuoliniai trikdžių bei nuostato eksperimentai.



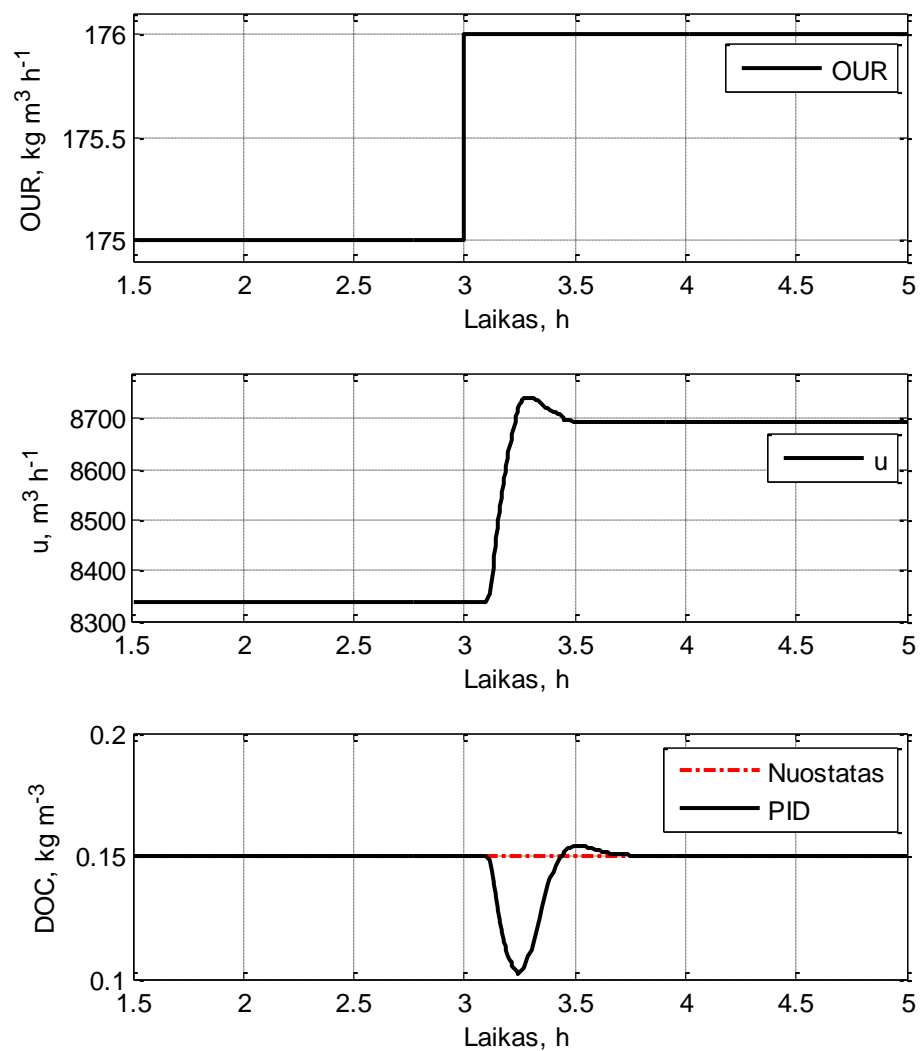
3.5 pav. Suderintos valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį

3.5 pav. pavaizduota proceso reakcijos kreivė į šuolinį ištirpusio deguonies koncentracijos (nuostato) pokytį, kai nuostato vertė pasikeičia nuo 0.15 kg m^{-3} iki 0.20 kg m^{-3} laiko momentu 3h. Valdantysis poveikis u šuoliniu laiko momentu pakinta nuo $8340 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ iki $8706 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.



3.6 pav. Suderintos valdymo sistemos reakcija į šulinį trikdžio F_{bio} pokytį

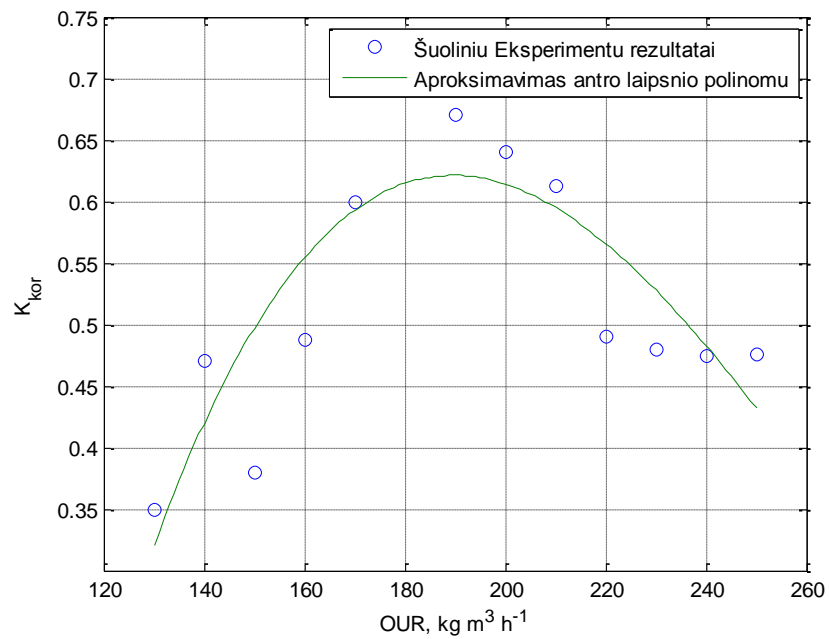
3.6 pav. pavaizduota proceso reakcijos kreivė į šulinį įtekančio srauto(trikdžio) pokytį, kai trikdžio vertė pasikeičia nuo $400 m^3 h^{-1}$ iki $800 m^3 h^{-1}$ laiko momentu 3h. Valdantysis poveikis u šuliniu laiko momentu pakinta nuo $8340 m^3 h^{-1}$ iki $8090 m^3 h^{-1}$.



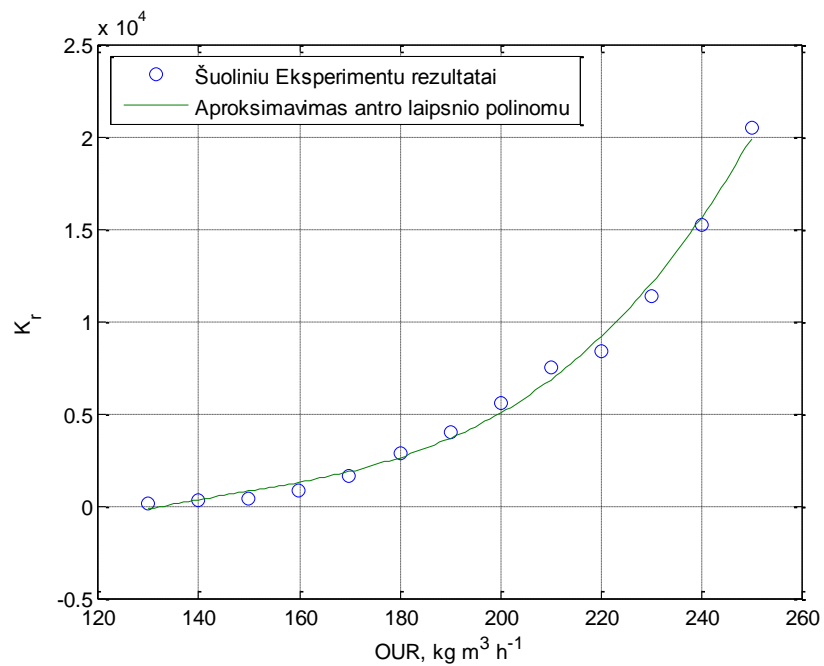
3.7 pav. Suderintos valdymo sistemos reakcija į šulinį trikdžio OUR pokytį

3.7 pav. pavaizduota proceso reakcijos kreivė į šulinį deguonies sunaudojimo greičio (trikdžio) pokytį, kai trikdžio vertė pasikeičia nuo 175 kg m³ h⁻¹ iki 176 kg m³ h⁻¹ laiko momentu 3h. Valdantysis poveikis u šuliniu laiko momentu pakinta nuo 8340 m³ h⁻¹ iki 8740 m³ h⁻¹.

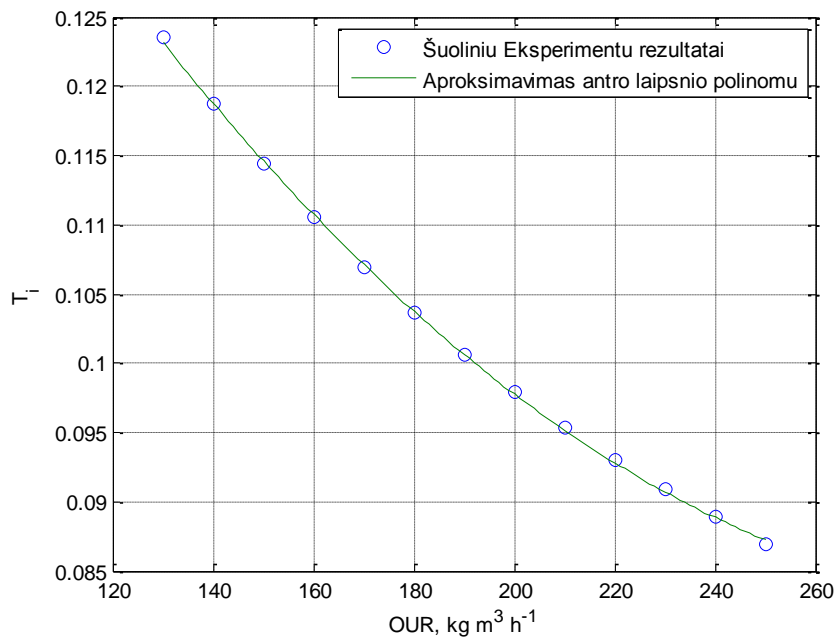
3.1.3 Stiprinimo numatymo metodu nustatytas PID reguliatoriaus parametų rinkinys



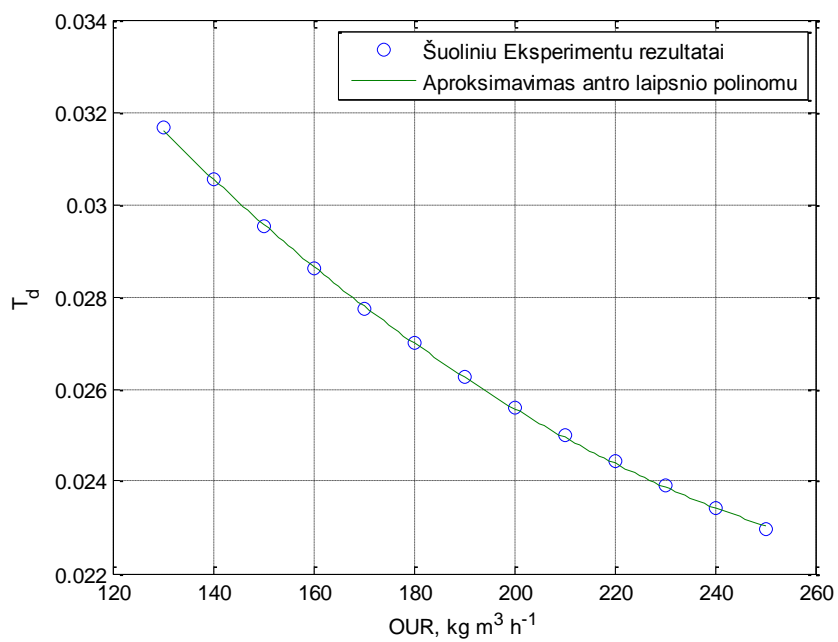
3.8 pav. Reguliatoriaus koreguojančio stiprinimo koeficiento nustatymas



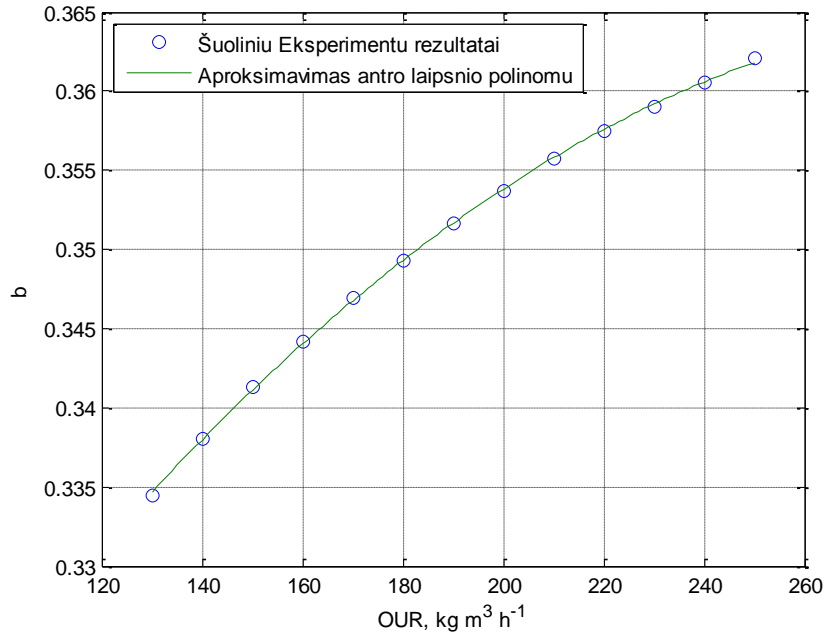
3.9 pav. Reguliatoriaus stiprinimo koeficiento nustatymas



3.10 pav. Regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios nustatymas



3.11 pav. Regulatoriaus diferencijavimo laiko pastoviosios nustatymas



3.12 pav. Regulatoriaus b parametro nustatymas

Atlikti šuoliniai eksperimentai proceso parametrams identifikuoti (tai aprašoma 3.1.1 skyriuje).

Gauti rezultatai naudojantis (2.18)-(2.21) formulėmis randami optimalūs regulatoriaus parametrai stacionarių proceso būsenų taškų aplinkoje. 3.9-3.12 pav. pateikti regulatoriaus parametrai stacionarių būsenų aplinkoje (apskritimais) ir jų interpoliacijos 2 laipsnio polinomais (tiesė).

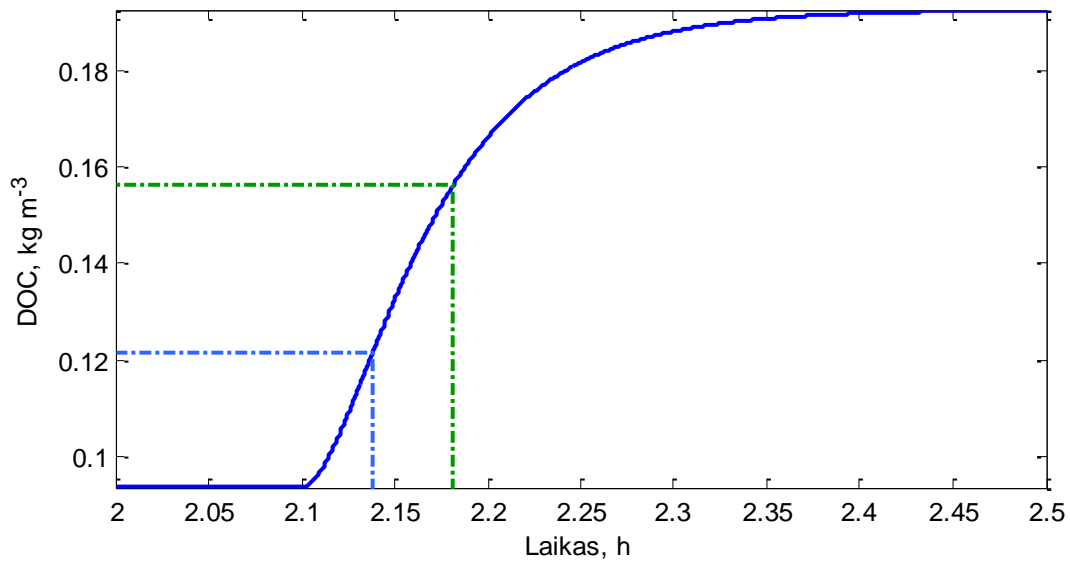
Regulatoriaus parametrai gauti keičiant deguonies sunaudojimo greitį OUR ribose nuo 120 kg m³ h. iki 260 kg m³ h., kai kiti proceso parametrai nekinta. OUR kintamasis atspindi proceso dinaminis parametru pokyčius.

3.2 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus parametrų nustatymas

Tiesioginio ryšio kompensatoriaus parametrai nustatomi pagal 2.5 skyriuje pateiktą metodologiją.

Atliekami šuoliniai eksperimentai proceso nuostatui ir trikdančiajam poveikiui. Iš šuolinių eksperimentų identifikuojami perdavimo funkcijų parametrai Smith'o metodu, kuris aptartas 3.1.1 skyriuje.

Atliekamas proceso šuolinis eksperimentas 3.13 pav., ir identifikuojami pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrai.

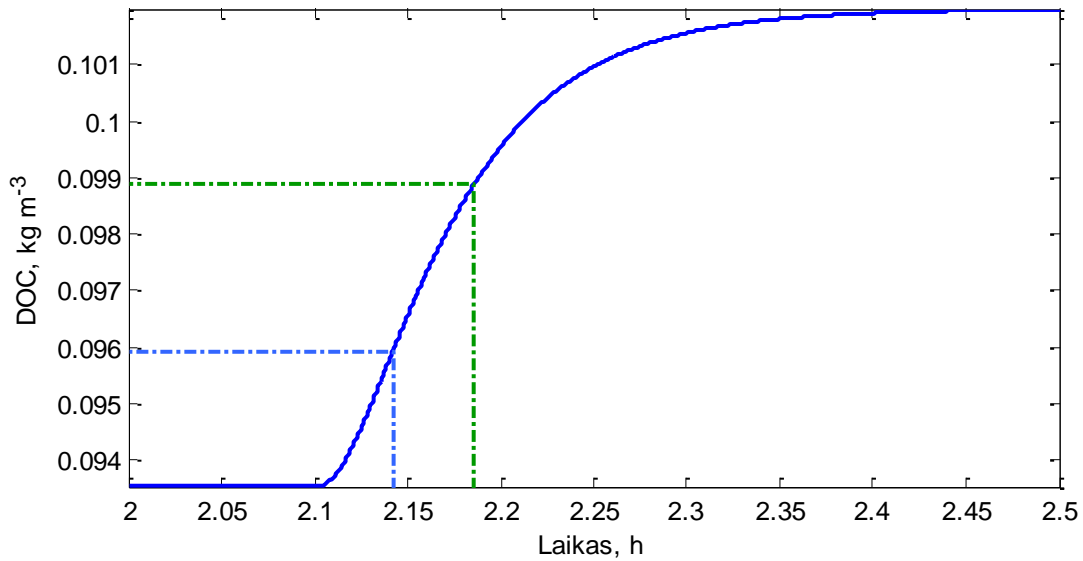


3.13 pav. Proceso reakciją į nuostato pokytį

Iš proceso reakcijos į šuolinį nuostato pokytį 3.13 pav. randami pirmos eilės su vėlavimu proceso perdavimo funkcijos modelio parametrai. Sudaroma proceso perdavimo funkcija pagal (2.23) formulę:

$$W_{pr}(s) = \frac{1.69 \cdot 10^{-4} e^{-0.1202 \cdot s}}{0.0654 \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Trikdančio poveikio perdavimo funkcija aproksimuojama pirmosios eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos modeliu:



3.14 pav. Proceso reakcija į trikdančiojo poveikio pokytį

Iš proceso reakcijos į šulinį trikdančiojo poveikio pokytį 3.14 pav. randami pirmos eilės su vėlavimo proceso perdavimo funkcijos modelio parametrai. Sudaroma proceso perdavimo funkcija pagal (2.24) formulę:

$$W_d(s) = \frac{9.9 \cdot 10^{-5} e^{-0.1168 \cdot s}}{0.0645 \cdot s + 1} \quad (3.2)$$

Kompensavimo grandies perdavimo funkcija randama pagal (2.25) formulę:

$$W_k(s) = K_k \frac{T_{pr}s + 1}{T_d s + 1} e^{-\tau_k s} = 0.5857 \frac{0.0654 \cdot s + 1}{0.0645 \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

3.3 Stiprinimo numatymo algoritmo ir PID reguliatoriaus su pastoviais parametrais tyrimas

Adaptacijos algoritmo vidutinė absoliutinė reguliavimo paklaida

$$\varepsilon_1 = \frac{\int_0^{\Delta T} |c_{set}(t) - c_{adapt}(t)| dt}{\Delta T} \quad (3.4)$$

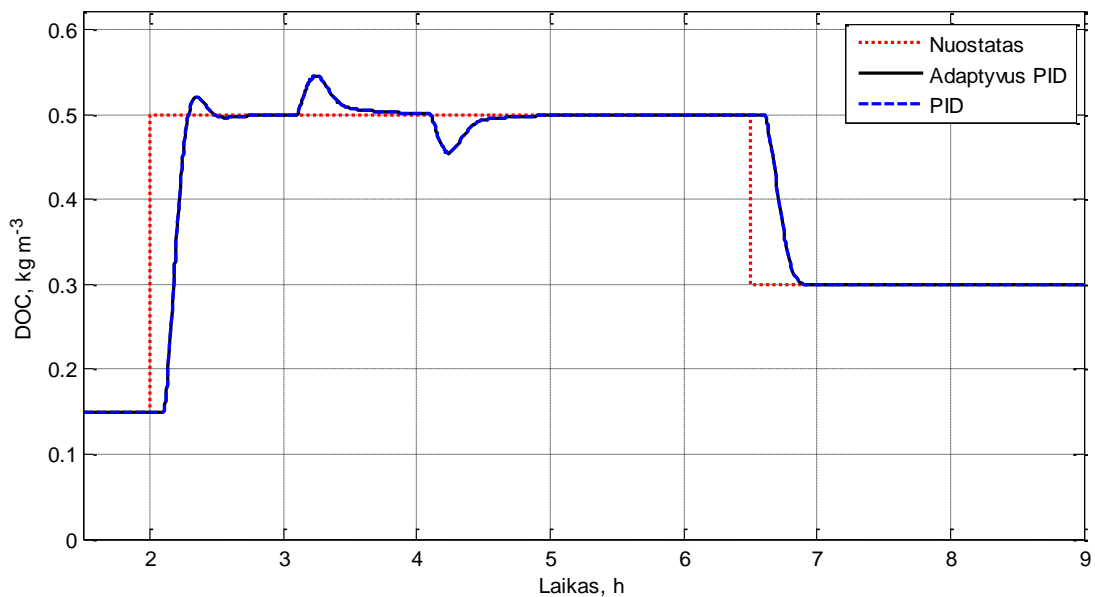
PID algoritmo su pastoviais parametrais vidutinė absoliutinė reguliavimo paklaida

$$\varepsilon_2 = \frac{\int_0^{\Delta T} |c_{set}(t) - c_{PID}(t)| dt}{\Delta T} \quad (3.5)$$

Apskaičiuojama santykinė procentinė paklaida tarp adaptacijos algoritmo ir PID algoritmo su pastoviais parametrais vidutinių absoliutinių reguliavimo paklaidų vertės, taikant (3.6) formulę.

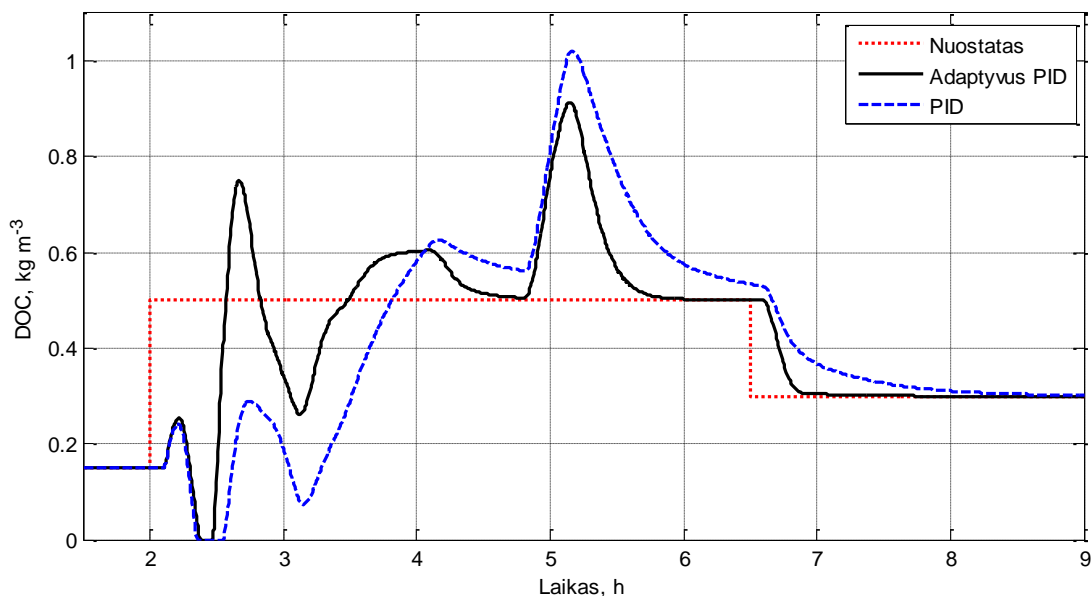
Santykinė procentinė paklaida gaunama į (3.6) lygtį įrašius (3.4) ir (3.5) lygtis.

$$\left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right| \cdot 100\% \quad (3.6)$$



3.15 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, OUR -const

3.15 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatorius, taikant stiprinimo numatymo algoritmą. Kai procesą veikia nuostato pokytis, įtekančio srauto pokytis F_{bio} , o sunaudojamo deguonies greitis nekinta $OUR=175 \text{ kg m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5-2.6pav. Santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 0% lyginant stiprinimo numatymo algoritmą su pastovių parametų PID algoritmu. Stiprinimo numatymo algoritmas neveikia dėl nekintančio trikdančiojo poveikio OUR proceso modeliavimo metu.

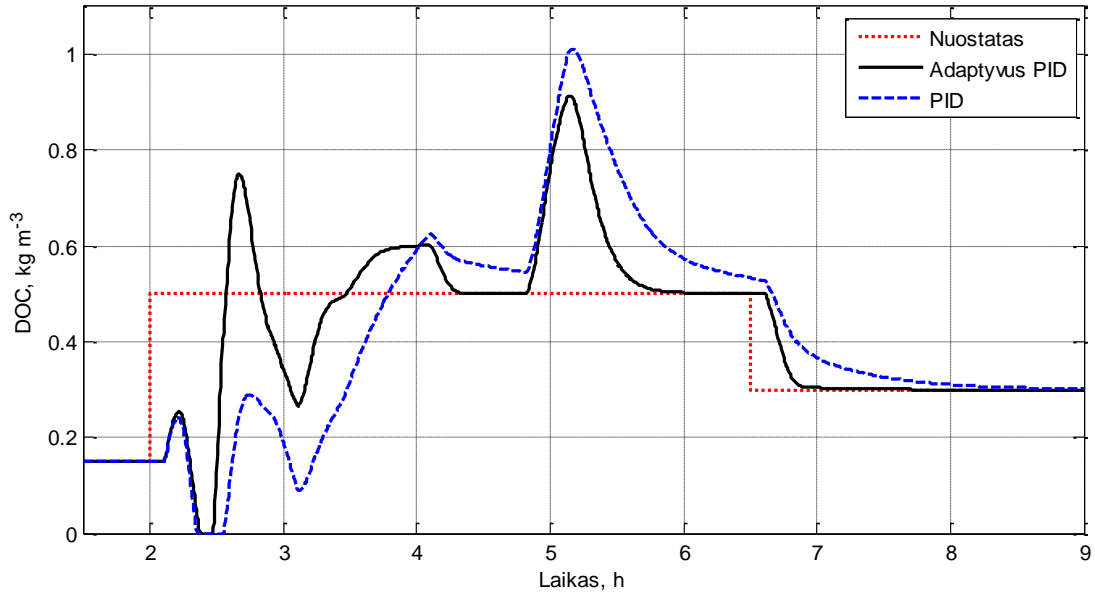


3.16 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -const, OUR –var

3.16 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatorius, taikant stiprinimo numatymo algoritmą.

Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis, o įtekantis srautas nekinta $F_{bio}=403 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5pav. ir 2.7pav.

Stiprinimo numatymo algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 42% mažesnė, lyginant su pastovių parametų PID algoritmu. Pastebimas adaptyvios valdymo sistemos pranašumas prieš valdymo sistemą su pastovių parametų PID reguliatoriumi.

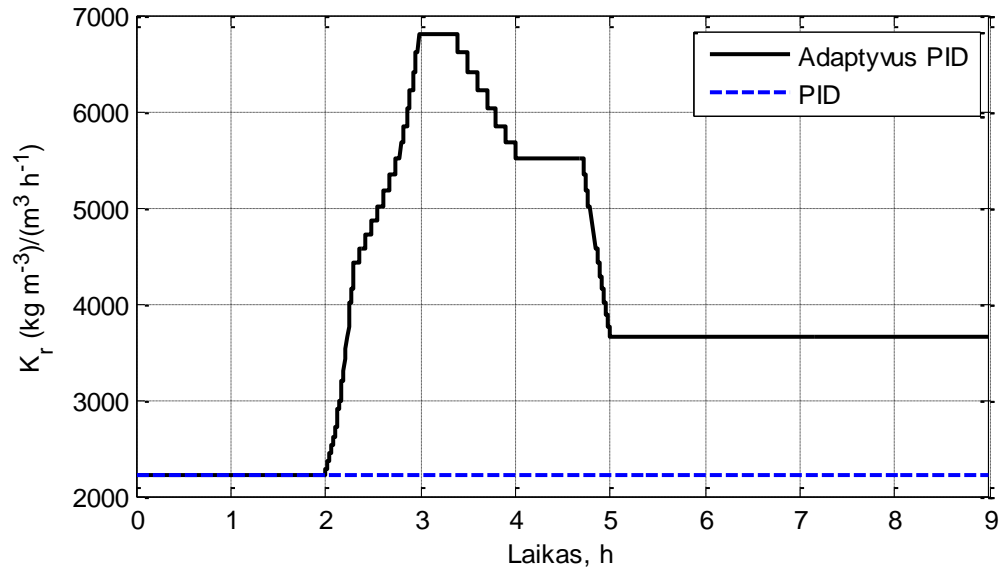


3.17 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, OUR –var
 3.17 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatorius taikant stiprinimo numatymo algoritmą. Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis ir įtekančio srautas pokytis F_{bio} . Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5-2.7 pav. Stiprinimo numatymo algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 42% mažesnė, lyginant su pastovių parametru PID algoritmu.

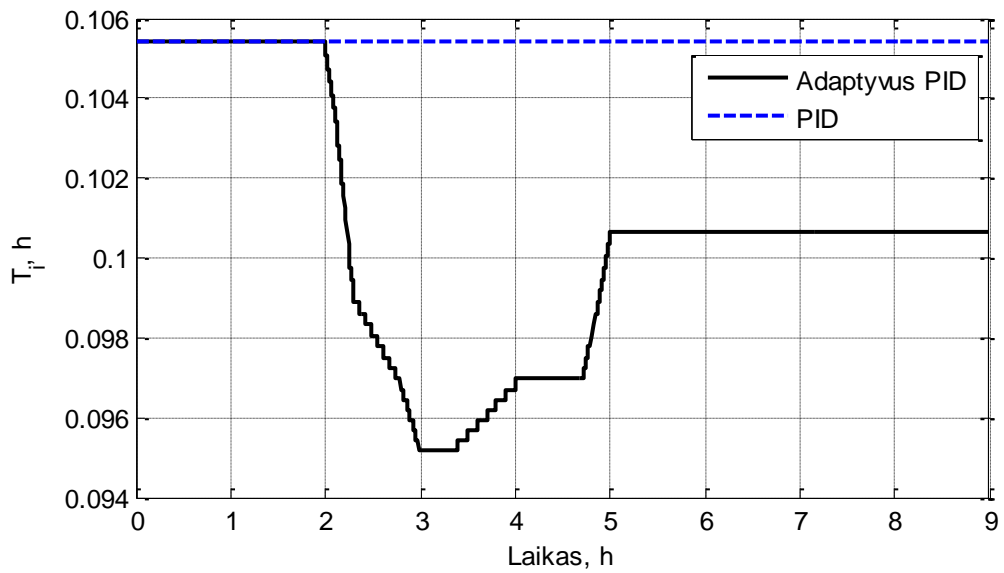
3.15 pav. pateiktu modeliavimo atveju stiprinimo numatymo algoritmas sutampa su pastovių parametru PID reguliatoriaus sistema, nes stiprinimo numatymo kintamas OUR yra pastovus. Absoliutinės reguliavimo paklaidos pateiktos imitacinio modeliavimo 3.16 pav. ir 3.17 pav. nesiskiria. Tai leidžia daryti išvadas, jog stiprinimo numatymo algoritmas nekompensuoja trikdančiojo poveikio F_{bio} procesui įtakos.

3.3.1 Stiprinimo numatymo algoritmo PID parametru kitimas

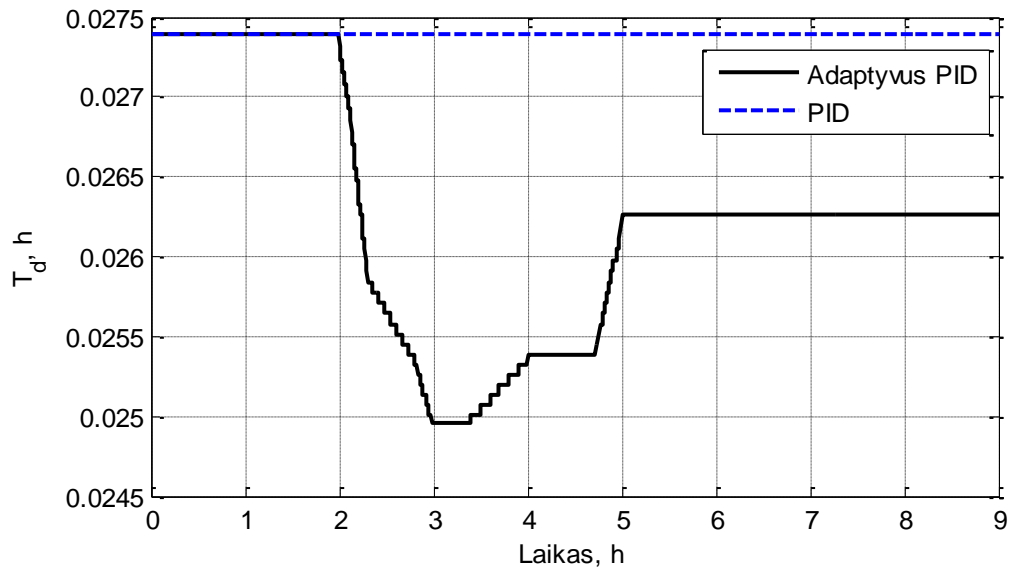
Norint palyginti stiprinimo numatymo PID reguliatoriaus ir klasikinio PID reguliatoriaus su pastoviais koeficientais ($K_r=2214$, $T_i=0.1054$, $T_d=0.0274$ $b=0.3481$) veikimą. Šie parametrai atitinka stiprinimo numatymo algoritmo, kai $OUR = 175 \text{ kg m}^3 \text{ h}^{-1}$.



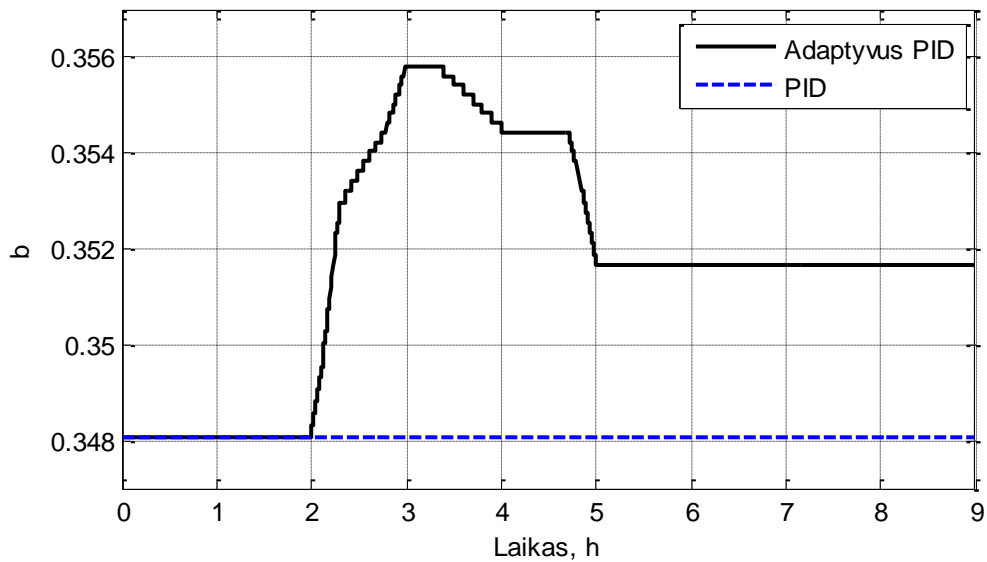
3.18 pav. Reguliatorių stiprinimo koeficientai



3.19 pav. Reguliatorių integravimo laiko pastoviosios



3.20 pav. Reguliatorių diferencijavimo laiko pastoviosios

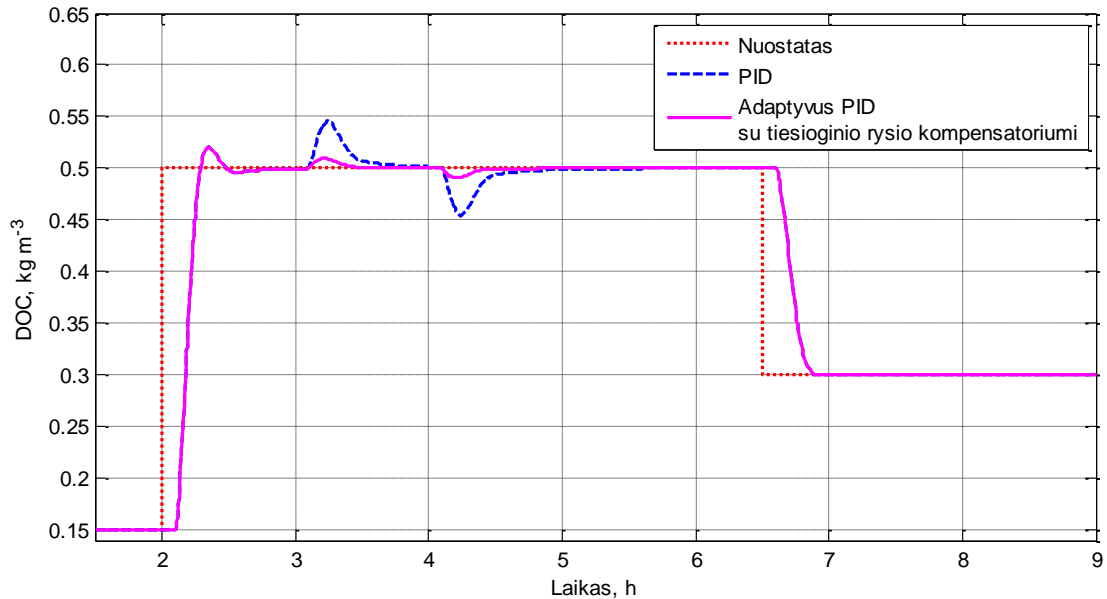


3.21 pav. Reguliatorių parametras b

Iš 3.18 -3.21 pav. matome, jog adaptyvaus reguliatoriaus parametrai keičiami pagal trikdančiojo poveikio 2.7pav. kitimą pagal 3.1.3 skyriuje pateiktą stiprinimo numatymo algoritmą.

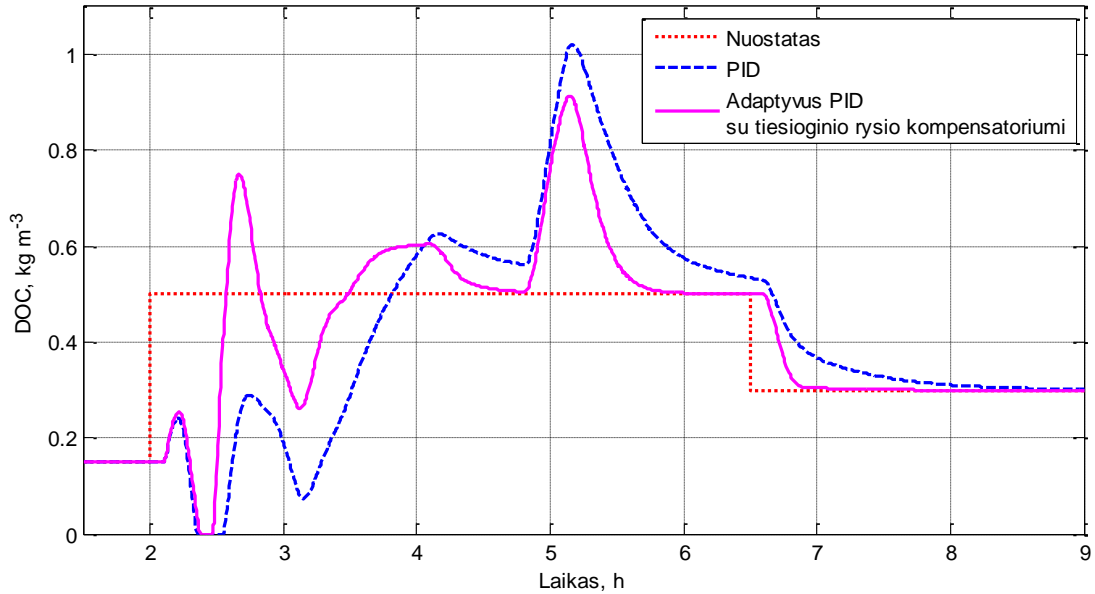
3.4 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus ir PID reguliatoriaus tyrimas

Atliekamas imitacinio modeliavimo tyrimas. Lyginamos adaptyvaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi ir PID reguliatoriaus su pastoviais reguliavimo parametrais sistemos.



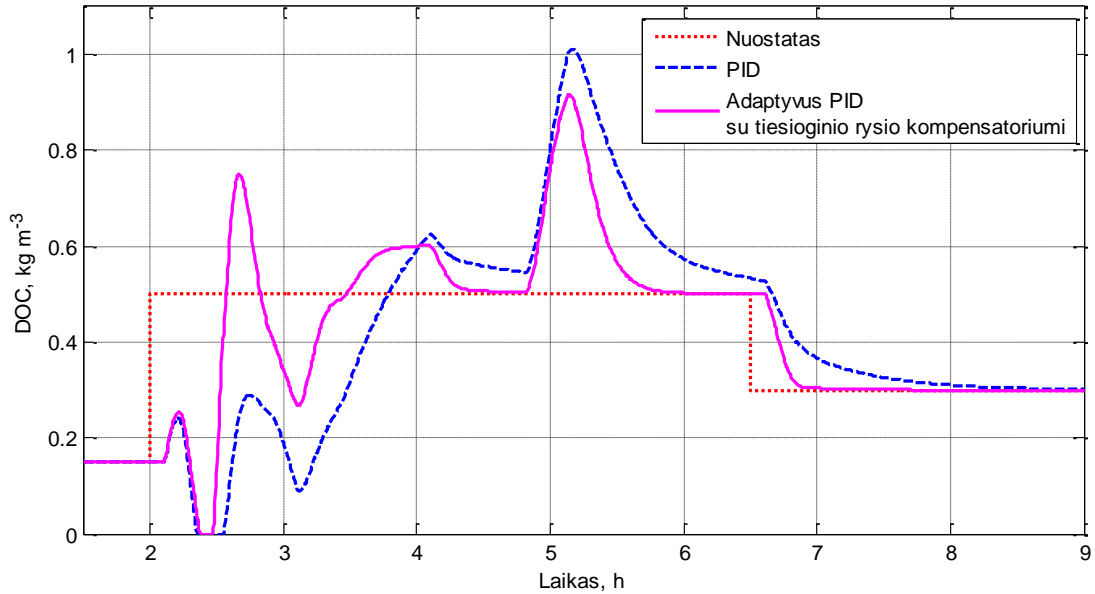
3.22 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, $\text{OUR} = \text{const}$

3.22 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatorius su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir pastovių parametru PID automatinio valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, įtekančio srauto pokytis F_{bio} , o sunaudojamo deguonies greitis nekinta $\text{OUR} = 175 \text{ kg m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5-2.6 pav. Adaptyvaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 7% mažesnė lyginant su pastovių parametru PID algoritmu.



3.23 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, $F_{\text{bio-const}}$, OUR –var

3.23 pav. grafike pavaizduotas adaptivus PID reguliatorius su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir pastovių parametru PID automatinio valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis, o įtekantis srautas nekinta $F_{\text{bio}}=403 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5pav. ir 2.7pav. Adaptivaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 42% mažesnė, lyginant su pastovių parametru PID algoritmu.



3.24 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, OUR –var

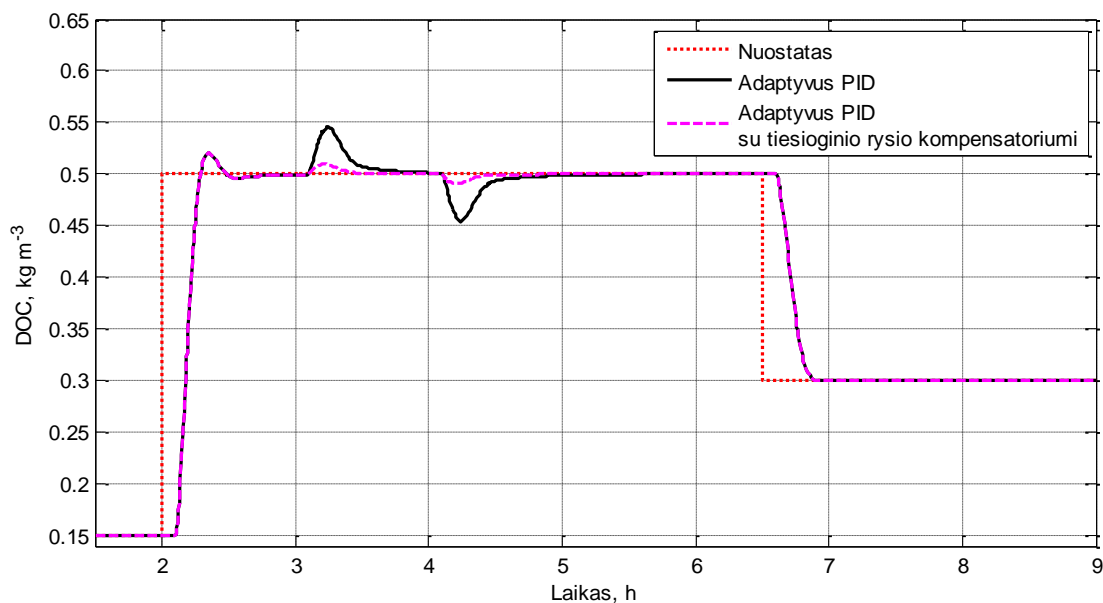
3.24 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatorius su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir pastovių parametru PID automatinio valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis ir įtekancio srautas pokytis F_{bio} . Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5-2.7pav. Adaptyvaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 41% mažesnė lyginant su pastovių parametru PID algoritmu.

3.22 pav. Tiesioginio ryšio reguliatorius trikdanciojo poveikio kompensavimo sistema pasiekė 7% geresnę valdymo kokybę už pastovių parametru PID valdymo sistemą.

3.23 pav. ir 3.24 pav. sistemų modeliavimo rezultatai skiriasi 1%, tai reiškia, jog trikdanciojo poveikio F_{bio} reikšmė proceso išėjimui nėra didelė.

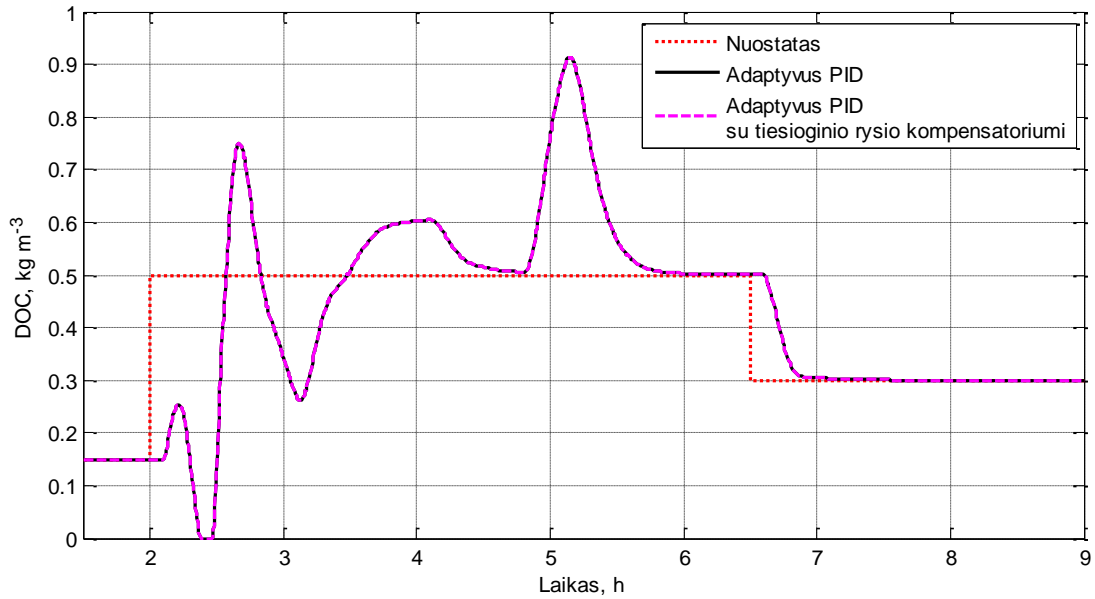
3.5 Tiesioginio ryšio kompensatoriaus ir stiprinimo numatymo algoritmo tyrimas

Atliekamas imitacinio modeliavimo tyrimas. Lyginamos adaptyvaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi ir adaptyvaus PID reguliatoriaus sistemos.



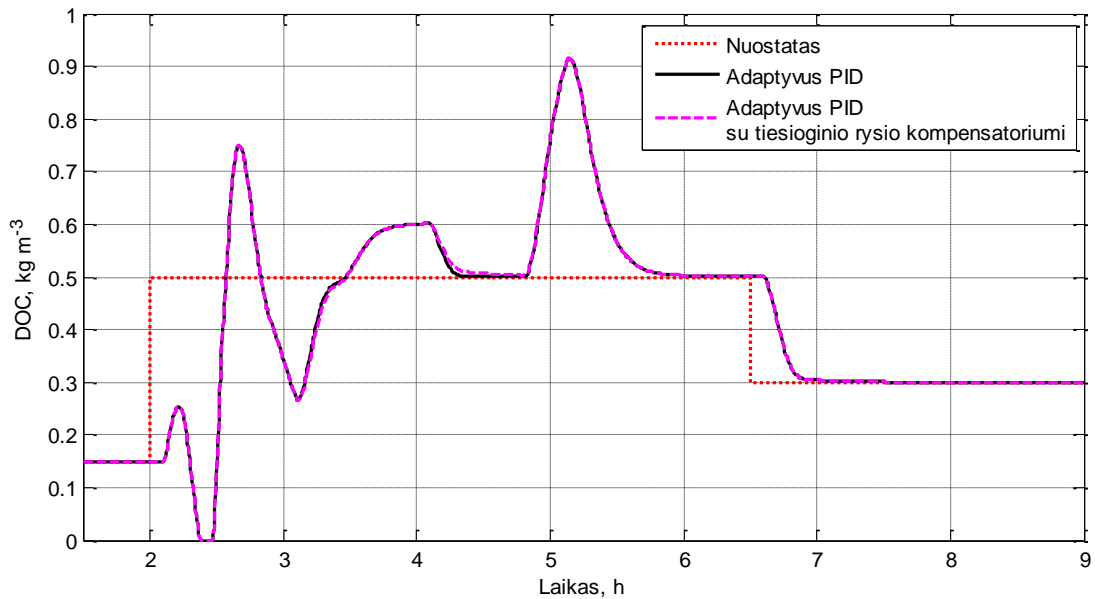
3.25 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, $OUR = \text{const}$

3.25 pav. grafike pavaizduotas adaptyvus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir stiprinimo numatymo algoritmu sudarytas PID reguliatoriaus, automatinių valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, įtekančio srauto pokytis F_{bio} , o sunaudojamo deguonies greitis nekinta $OUR=175 \text{ kg m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5-2.6pav. Adaptyvaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 7% mažesnė, lyginant su stiprinimo numatymo PID algoritmu.



3.26 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, $F_{\text{bio}}\text{-const}$, OUR –var

3.26 pav. grafike pavaizduotas adaptivus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir stiprinimo numatymo algoritmu sudarytas PID reguliatoriaus, automatinių valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis, o įtekantis srautas nekinta $F_{\text{bio}}=403 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5pav. ir 2.7pav. Adaptivaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 1% mažesnė, lyginant su stiprinimo numatymo PID algoritmu.



3.27 pav. Automatinio valdymo sistemų veikimo modeliavimas, kai c -var, F_{bio} -var, OUR –var

3.27 pav. grafike pavaizduotas adaptivus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio reguliatoriumi ir stiprinimo numatymo algoritmu sudarytas PID reguliatoriaus, automatinių valdymo sistemų veikimo palyginimas. Kai procesą veikia nuostato pokytis, sunaudojamo deguonies greičio OUR pokytis ir įtekančio srautas pokytis F_{bio} . Imitacinio modeliavimo sąlygos pavaizduotos 2.5pav. - 2.7pav. Adaptivaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi algoritmo santykinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 2% mažesnė, lyginant su stiprinimo numatymo PID algoritmu.

Lyginamos adaptivaus PID reguliatoriaus su tiesioginio ryšio kompensatoriumi ir adaptivaus PID reguliatoriaus sistemos veikia labai panašiai. 3.25 pav. pastebimas 7% sistemos su tiesioginio ryšio kompensatoriumi pranašumas, kai proceso metu kinta įtekantis nuotekų srautas F_{bio} .

4 Rezultatai ir išvados

1. Sudarytas (Matlab/Simulink aplinkoje) modelis aeracijos procesui pramoniniame aerotanke modeliuoti, ir atliktas proceso imitacinis modeliavimas veikiant įvairiems trikdantiems poveikiams.
2. Sudarytas tiesioginio ryšio valdymo algoritmas ištirpusio deguonies koncentracijos trikdančiojo poveikio (įtekančio srauto) kompensavimui. Kompensatoriaus darbo kokybės rodikliai palyginimi su pastovių parametų PID reguliatoriaus veikimu. Kai procesą veikia įtekančio srauto trikdantysis poveikis, trikdančiojo poveikio kompensatoriaus vidutinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 7% mažesnė lyginant su pastovių parametų PID reguliatoriumi.
3. Sudarytas stiprinimo numatymo (Gain scheduling) algoritmas ištirpusio deguonies koncentracijos reguliatoriaus parametų adaptacijai realiu laiku. Adaptyvios sistemos darbo kokybės rodiklių palyginimas su pastovių parametų PID reguliatoriaus veikimu. Kai procesą veikia deguonies sunaudojimo greičio trikdantysis poveikis, adaptyvios sistemos vidutinė absoliutinė reguliavimo paklaida yra 42% mažesnė lyginant su pastovių parametų PID reguliatoriumi.

5 Literatūra

1. *Hamilton, R., Braun, B., Dare, R., Koopman, B.* Control issues and challenges in wastewater treatment plants. *Control Systems, IEEE* (Volume:26 , Issue: 4),2006, p. 63 – 69.
2. Ke Wang, Weiguang Li, Duoying Zhang, Jinlin Zou, Yunbei Li. The effects of sludge particle size on oxygen transfer and dynamics in the composting of digested sludge. 2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE), 2010, p. 132 – 136
3. K. J. Åström and T. Hägglund. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning.* Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 2 edition, 1995. p. 222-239.
4. M.A.Johnson., M. H.Moradi. *PID Control New Identification and Design Methods,*2005, p. 148-149.
5. Levy, S., Korotkin, S., Hadad, K., Ellenbogen, A. PID autotuning using relay feedback. 2012 IEEE 27th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2012, p. 1 - 4.
6. M. A . Boudreau, G. K. McMillan. *New Directions In Bioprocess Modeling And Control.* 2007, p. 87.
7. Ye Hong-Tao, Li Zhen-Qiang, Luo Wen-Guang. Dissolved Oxygen Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process Using Adaptive Fuzzy PID Control. *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese,* 2013, p. 7510 - 7513
8. Binh Lam Hoang., Duy Nguyen Tien., Fei Luo., Phuong Huy Nguyen. Dissolved Oxygen Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process Using Hedge Algebraic Control 2014 7th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics (BMEI 2014),2014, p. 827 – 832.
9. K. Jonelis, K. Brazauskas, D. Levišauskas. A System For Dissolved Oxygen Control In Industrial Aeration Tank, *Information technology and control,* Vol.41, No.1,2012, p.46-50.
10. Olsson M. Simulation Comparison of Auto-Tuning Methods for PID Control, *Linköping 2008.* p. 24-28.
11. T. Tekorius, D. Levišauskas. Comparative Investigation of Feed-Forward Control Algorithms // *Electronics and Electrical Engineering.* Kaunas: Technologija, Nr. 9(115), 2011, p. 79–82.
12. D. Levišauskas. *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas,* Vilnius, 2008, p 24-86.