



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Adaptyvios pH reguliavimo sistemos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Mindaugas Pečiauskas

Projekto autorius

prof. dr. Vytautas Galvanauskas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Adaptyvios pH reguliavimo sistemos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Mindaugas Pečiauskas

Projekto autorius

prof. dr. Vytautas Galvanauskas

Vadovas

prof. dr. Donatas Levišauskas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mindaugas Pečiauskas

Adaptyvios pH reguliavimo sistemos tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mindaugo Pečiausko, baigiamasis projektas tema „Adaptyvios pH reguliavimo sistemos 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)

Pečiauskas Mindaugas. Adaptyvios pH reguliavimo sistemos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas. Vadovas prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: adaptyvus valdymas, PI reguliatorius, pH reguliavimas, biotechnologiniai procesai.

Kaunas, 2019. 47p.

Santrauka

Šiame darbe buvo tiriama adaptyviojo reguliatoriaus valdymo kokybė valdant bioreaktoriaus pH lygį. Šiam tikslui pasiekti buvo sudarytas bioreaktoriaus modelis naudojant *MATLAB Simulink* programinę įrangą. Modelyje buvo sudarytas biomasės kultivavimo proceso blokas, kuriame diferencialinėmis lygtimis aprašytos šio proceso tūrio, biomasės koncentracijos, vandenilių jonų koncentracijos ir substrato koncentracijos priklausomybės. Adaptyviojo PI reguliatoriaus adaptacijos parametru optimizacijai sudarytas algoritmas, kuriame naudojant integralinius reguliavimo kokybės kriterijus buvo optimizuoti adaptacijos parametrai ir iš šių pasirinktas derinys, kuris palaiko aukščiausią reguliavimo kokybę. Po to, pritaikius trikdžius adaptyviojo reguliatoriaus valdymo kokybė buvo palyginta su klasikiniu PI reguliatoriaus valdymo kokybe.

Pečiauskas Mindaugas. Investigation of adaptive pH control system. Master's Final Degree Project. Supervisor prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: adaptive control, PI controller, pH control, biotechnological processes.

Kaunas, 2019. 47p.

Summary

The task of this work was to investigate the pH control quality of adaptive controller. To achieve this, a bioreactor model was created using *MATLAB Simulink* software. In this model, a biomass cultivation process block was formed, where differential equations describe the volume, biomass concentration, hydrogen ion concentration and substrate concentration of the cultivation medium. An optimization algorithm is used to optimize the adaptation parameters of the adaptive controller. The adaptation parameters were optimized using integral criteria of the control performance. Then a combination of adaptation parameters that meets the highest quality of control was selected. After that, disturbances of substrate solution pump efficiency and alkali solution pump efficiency applied. Also, the volume feedback signal and pH sensor feedback signal were disturbed using white noise disturbances. After investigation of the applied disturbances to the process, the control quality of the adaptive controller was compared to the quality of the conventional PI controller.

Turinys

Įvadas	7
1. Literatūros apžvalga ir analizė	8
1.1 pH lygio reguliavimo svarba	8
1.2 pH savybės	8
1.3 pH lygio matavimas	10
1.4 Tirpalo maišymo įrangos įtaka pH lygio matavimui.....	12
1.5 Tiekiamo reagento savybių įtaka pH reguliavimui	12
1.6 Adaptyvaus valdymo analizė	13
1.7 Adaptyvaus valdymo sistemos palyginimas su klasikine grįžtamojo ryšio valdymo sistema .	13
1.8 Tiesioginis adaptyvus valdymas	15
1.9 Netiesioginis adaptyvus valdymas	17
1.10 Adaptyvusis valdymas naudojant stiprinimo numatymą	18
2. pH reguliavimo sistemos modelio sudarymas	20
2.1 Modelio aprašymas	20
2.1.1 Proceso modelio diferencialinės lygtys	20
2.1.2 Kitos išraiškos.....	21
2.2 Sudarytas modelis Simulink aplinkoje.....	22
2.2.1 Modelio prielaidos ir apribojimai	22
2.2.2 Modelio sandara.....	22
2.2.3 Modelio kintamieji.....	26
2.2.4 Valdymo blokų sudarymas. Klasikinis PI reguliatorius	29
2.2.5 Valdymo blokų sudarymas. Adaptyvusis PI reguliatorius	31
2.3 Adaptacijos parametrų optimizavimas	33
3. Reguliavimo sistemų tyrimas	35
3.1 Reguliavimo sistemų reakcija į nuostato pakeitimą.....	35
3.2 Reguliavimo sistemų reakcija į šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimą.....	37
3.3 Reguliavimo sistemų reakcija į substrato pamaitinimo siurblio našumo sumažėjimą.....	40
3.4 Adaptyviojo PI regulatoriaus reguliavimo kokybės tyrimas esant tūrio matavimo jutiklio trikdžiui.....	42
3.5 Reguliavimo sistemų reakcija esant pH jutiklio trikdžiams.....	44
Išvados	46
Literatūros šaltiniai	47
Priedai	48
1 priedas. Sudaryto modelio schema	49
2 priedas. MATLAB Function Fs bloko kodas	53
3 priedas. α_1 ir α_2 parametrų aprašymo bloko kodas.....	53
4 priedas. β_1 ir β_2 parametrų aprašymo bloko kodas.....	53
5 priedas. Adaptyviojo PI regulatoriaus adaptacijos parametrų optimizavimo algoritmas.....	54

Ivadas

Norint valdyti procesus reguliuojant pH lygį, didžiausi sunkumai iškyla dėl netiesinės pH lygio priklausomybės nuo dozuojamo reagento kiekio, kuri vadinama titravimo kreive. Jeigu ši funkcija kinta plačiame diapazone ir turi žymų netiesiškumą, tuomet klasikiniai tiesiniai modeliai ne visada pasiekia tenkinamus rezultatus. Vienas iš galimų sprendimų yra pritaikyti adaptyvųjų valdymą, kuris gali būti įgyvendinamas naudojant savaimę susiderinantį PI reguliatorių, kuriame pagal valdomo objekto matuojamus parametrus yra keičiami reguliatoriaus parametrai, taip gaunant geresnę reguliavimo kokybę, negu taikant klasikinius reguliatorius.

Šiuo darbu siekiama iširti adaptyviojo reguliatoriaus valdymo kokybę valdant bioreaktoriaus pH lygį. Šiam tikslui pasiekti yra sudaromas bioreaktoriaus modelis naudojant *MATLAB Simulink* programinę įrangą. Modelyje yra sudaromas valdomojo biomasės kultivavimo proceso blokas, kuriame diferencialinėmis lygtimis yra aprašomas šio proceso tūrio, biomasės koncentracijos, vandenilių jonų koncentracijos ir substrato koncentracijos priklausomybės. Tam, kad būtų palaikomas maksimalus santykinis biomasės augimo greitis ir gautūsi maksimali biomasės išeiga yra suformuojamas substrato pamaitinimo srauto profilis. Toliau sudaromi šarmo ir rūgšties tirpalų dozavimo blokai, klasikinio PI ir adaptyviojo PI reguliatoriaus blokai. Adaptyviam PI reguliatoriui pagal proceso pH lygio palaikymą yra optimizuojami adaptacijos parametrai. Toliau sudarytais reguliatoriais, naudojant šarmo ir rūgšties dozavimo blokus bioreaktoriuje yra palaikomas pH lygis įvairiomis sąlygomis: idealiomis sąlygomis, esant substrato siurblio pamaitinimo trikdžiui, šarmo tirpalo siurblio trikdžiui, tūrio matavimo ir pH matavimo trikdžiams.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

1.1 pH lygio reguliavimo svarba

pH lygio reguliavimas padeda užtikrinti produkto kokybę, sumažina valdomo objekto įrangos koroziją. Taikant pakankamai efektyvų pH lygio valdymą yra sutaupoma reagento, skirto reguliuoti pH lygį.

Keletas pH lygio reguliavimo pritaikymo sričių:

- biotechnologijose pH lygio reguliavimas taikomas mikroorganizmų auginimui ir metabolizmui;
- chemijos pramonėje - druskų kristalizacijos procesuose;
- paviršių apdirbimo procesuose – efektyviai šalinant dažus ir lakus, nikelio dangos kietumui ir šviesumui parinkti;
- fermentacijos procesuose – fermentacijos trukmės reguliavimui ir organizmų auginimo procesuose;
- farmacijoje – kūno reakcijos tyrimuose, preparatų stabilumo ir efektyvumo tyrimuose;
- vandens minkštinimo, valymo procesuose ir kitose srityse.

Taigi iš pateiktų taikymo pavyzdžių matosi, kad šiuolaikinėje pramonėje pH lygio reguliavimas užima svarbią vietą, todėl yra naudinga atlikti tolimesnius pH lygio valdymo tyrimus, kad būtų padidintas valdymo efektyvumas.

1.2 pH savybės

Logaritminė priklausomybė tarp pH ir vandenilio jonų aktyvumo (2) suteikia galimybę išmatuoti vandenilio jonų koncentraciją diapazone nuo 1 iki 10^{-14} , kas pH skalėje atitinka ribas nuo 0 iki 14.

$$a_H = 10^{-pH} \quad (1)$$

$$pH = -\log(a_H) \quad (2)$$

$$a_H = \gamma \cdot c_H \quad (3)$$

Čia:

a_H – vandenilio jonų aktyvumas (mol/l);

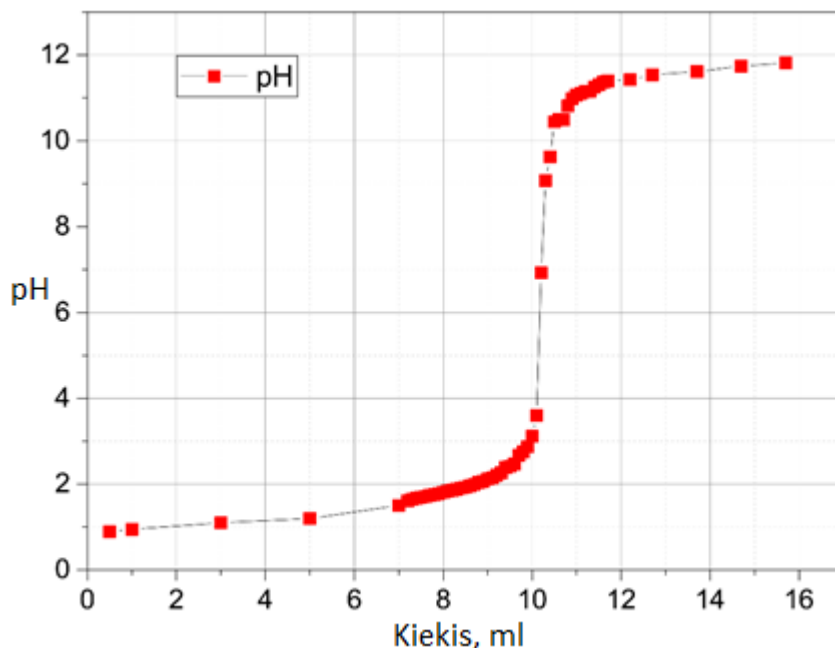
c_H – vandenilio jonų koncentracija (mol/l);

γ – aktyvumo koeficientas (tirpalams $\gamma = 1$);

Vandenilio jonų aktyvumas yra vandenilio jonų galimybės judėti ir kombinuoti su kitais jonais, esančiais tirpale, matas. Atskiestiems tirpalams efektyvi ir reali koncentracija yra lygios, todėl juose aktyvumo koeficientas lygus 1. Tirpalams, kuriuose yra didelė jonų koncentracija, kitų krūvių buvimas sumažina efektyvią koncentraciją, kuri tampa mažesnė negu reali koncentracija, todėl aktyvumo koeficientas γ sumažėja žemiau vieneto.

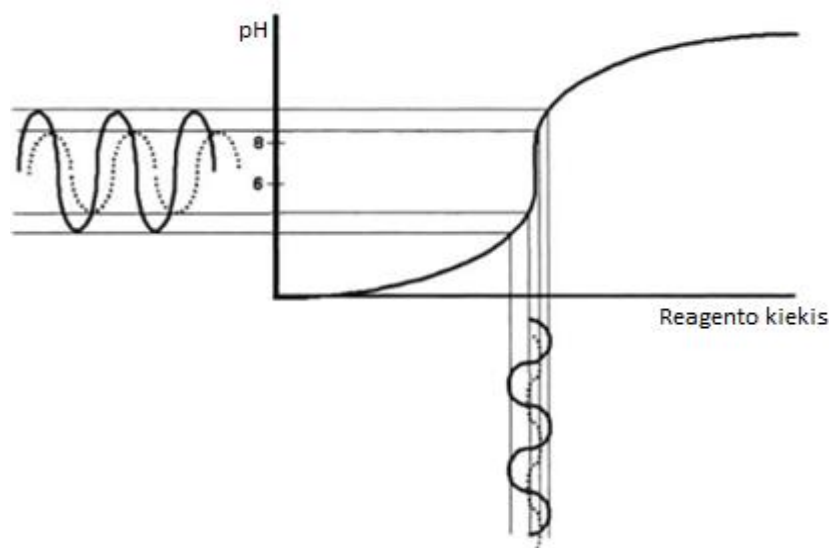
Neutraliame taške esant 25°C tirpalo temperatūrai vandenilio ir hidroksido jonų koncentracijos yra lygios viena kitai, t.y. jų koncentracijos lygios 10^{-7} , o pH skalėje tai atitinka vertę lygią 7 [2].

Toliau tam, kad geriau vizualizuoti pH lygio netiesiškumą yra naudojama titracijos kreivė (1 pav.). Titracijos kreivė – tai tirpalo pH lygio priklausomybė nuo įpilamo reagento koncentracijos, tūrio arba srauto.



1 pav. Titracijos kreivės pavyzdys

Iš titracijos kreivės matosi, kad į rūgštinį tirpalą pridėjus bazės tirpalo ir atvirkščiai, bendras tirpalo pH lygis kinta netiesiškai, ir šio kitimo sparta labai išauga diapazone nuo pH=3 iki pH=11 priklausomai nuo tirpalo ir pridedamo reagento stiprumo. Todėl net nežymus reagento nuokrypis gali sukelti žymius pH nuokrypius (2 pav.). Palyginimui, naudojant stiprios rūgšties ir šarmo reagentų sistemą, titravimo proceso matavimų eilė ties pH=6...7 yra 6 eilėmis didesnė nei matavimai, kuomet pH yra tarp 0 ir 1. Taigi šiame diapazone norint tiksliai nustatyti tirpalo neutralų pH tašką arba artimą jam, turėtų būti sumažinta titravimo sparta arba reagento tirpalo koncentracija.



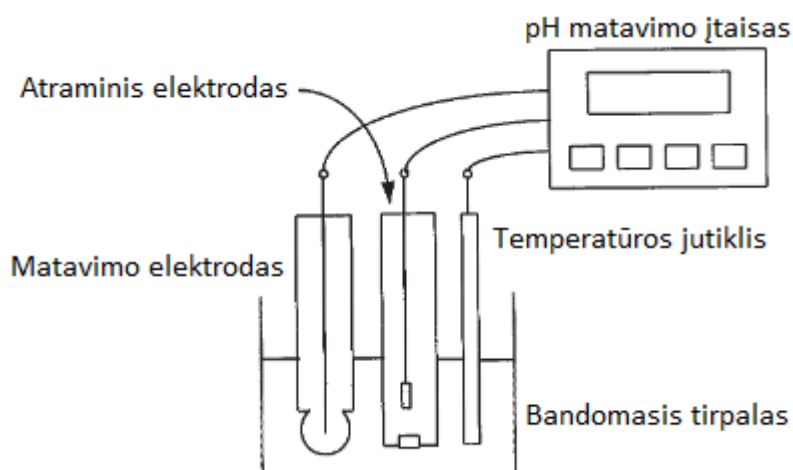
2 pav. Reagento svyravimų sukeltami pH lygio svyravimai

1 Lentelėje pateikiamas vandenilio ir hidroksido jonų koncentracijų palyginimas esant įvairioms pH vertėms. Iš šios lentelės duomenų galima pastebėti, kad pH matavimo diapazonas yra labai platus ir palyginus su įvairių rūšių matavimais, jokio kito tipo matavimai neturi tokio plataus ir tikslaus matavimų spektro [2].

1 lentelė. Vandenilio ir hidroksido jonų koncentracija 25°C temperatūros vandens tirpale

pH	Vandenilio jonų Koncentracija (H^+)	Hidroksido jonų koncentracija (OH^-)
0	10^0	10^{-14}
1	10^{-1}	10^{-13}
2	10^{-2}	10^{-12}
3	10^{-3}	10^{-11}
4	10^{-4}	10^{-10}
5	10^{-5}	10^{-9}
6	10^{-6}	10^{-8}
7	10^{-7}	10^{-7}
8	10^{-8}	10^{-6}
9	10^{-9}	10^{-5}
10	10^{-10}	10^{-4}
11	10^{-11}	10^{-3}
12	10^{-12}	10^{-2}
13	10^{-13}	10^{-1}
14	10^{-14}	10^0

1.3 pH lygio matavimas

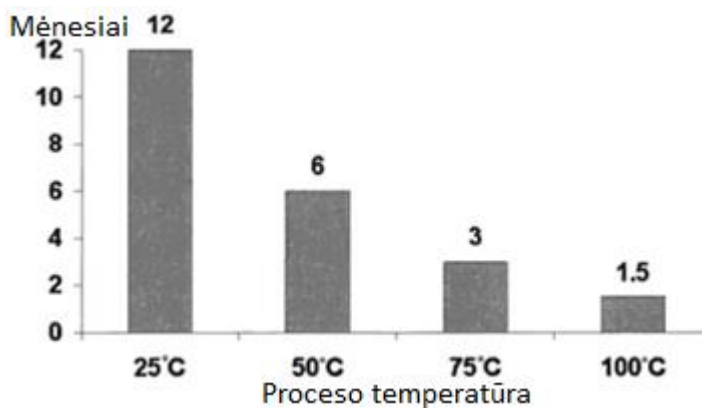


3 pav. pH lygio matavimo sistema

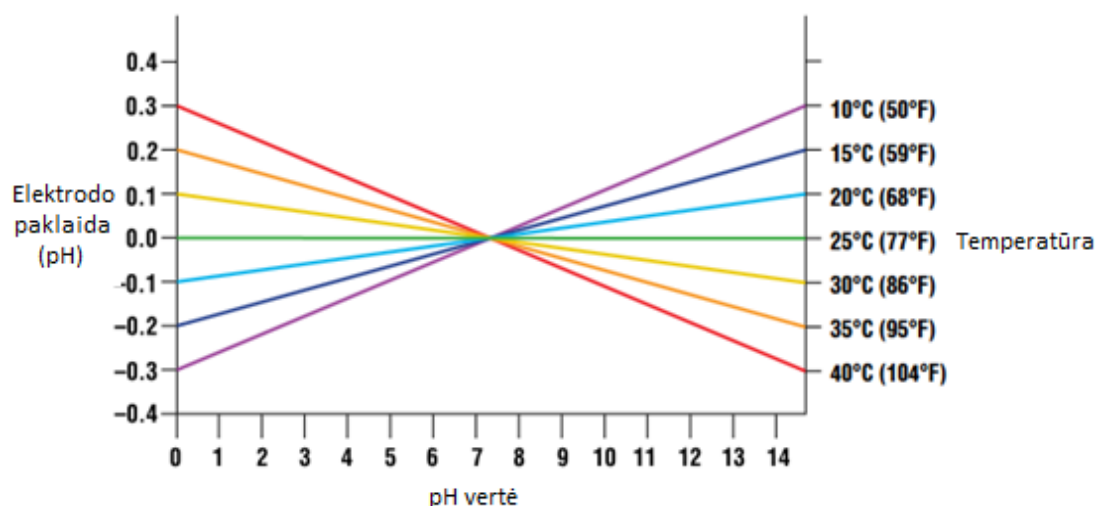
pH lygis yra išmatuojamas matuojant elektrocheminių elementų sistemos (elektrodų) įtampą (3 pav.). Šią sistemą sudaro matavimo elektrodas, atraminis elektrodas, temperatūros jutiklis ir tirpalas, kurio pH lygis yra matuojamas. Šios sistemos įtampa yra tiesiogiai proporcinga tirpalo pH lygiui. Matuojant pH lygi yra įvertinama temperatūra, taigi tam tikslui atitinkamai yra naudojamas

temperatūrinis faktorius, kuris yra įvertinamas pagal temperatūros jutiklio duomenis. Temperatūros jutiklis ir elektrodai dažnai yra surenkami į vieną korpusą [5].

Procesai, kuriuose yra reikalinga aukšta temperatūra, trumpina elektrodų veikimo laiką. Elektrodų veikimo laikas (kuomet tirpalo pH lygis kinta tarp 2 ir 10) priklausomai nuo temperatūros pavaizduotas 4 pav. [2].



4 pav. Temperatūros įtaka elektrodų veikimo laikui

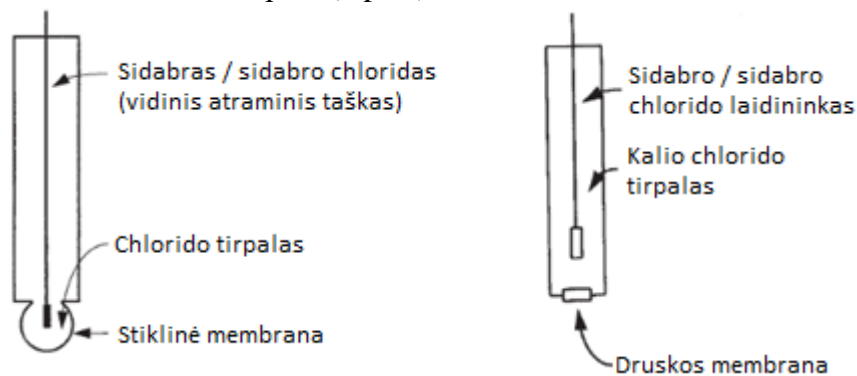


5 pav. pH jutiklio paklaidos kintant temperatūrai

Šios sistemos įtampa yra lygi matavimo elektrodo, atraminio elektrodo ir tirpalo terpės įtampų sumai. Matavimo elektrodo potencialas priklauso tik nuo tirpalo pH lygio. Atraminio elektrodo potencialui tirpalo pH lygis įtakos neturi, taigi jis suteikia stabilią atraminę įtampą, pagal kurią yra matuojamas matavimo elektrodo potencialas. Visiems šiems potencialams įtakos turi temperatūra. Paklaidos atsirandančios elektroduose dėl temperatūros, pavaizduotos 5 pav. [4].

Matavimo elektrodą sudaro plonas stiklo sluoksnis (stikline membrana), kuris jautrus pH pokyčiams. Elektrodo viduje yra užsandarintas kalio chlorido tirpalas, kurio pH lygus 7. Taip pat viduje yra sidabro/sidabro oksido laidininkas. Šis laidininkas kontaktuodamas su vidiniu tirpalu (kalio chloridu) sudaro vidinę atraminę įtampą. Kadangi šio tirpalo koncentracija yra pastovi, taigi šio elektrodo potencialas taip pat yra pastovus. Matavimo elektrodai kontaktavus su išoriniu tirpalu, ties stikline membrana susidaro potencialų skirtumas, kuris yra palyginamas su atraminio elektrodo įtampa.

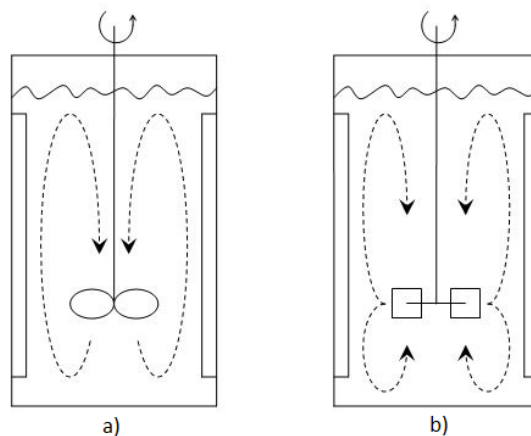
Atraminio elektrodo apačioje yra suformuota druskos membrana, kuri sudaro elektrinį kontaktą tarp šio atraminio elektrodo ir tirpalo (6 pav.) [5].



6 pav. pH matavimo elektrodo ir atraminio elektrodo sandara

1.4 Tirpalo maišymo įrangos įtaka pH lygio matavimui

Bioprocėsų reaktoriuose dėl maišymo yra sukuriama daugybė įvairių vidinių skysčio srautų, o dėl to yra nemažai įvairių maišymo kokybės įvertinimo parametru. pH reguliavimui maišymo metu turėtų būti sukuriamas vertikalus (ašinis) skysčio srautas, kaip parodyta (7 pav. a), kur skystis būtų traukiamas iš viršaus išilgai maišymo ašies į apačią ir grįžtų į viršų talpos vidinių sienų paviršiumi. Radialinio maišymo atveju (7 pav. b) skystyje yra sukuriamas nevienodas skysčio maišymasis – intensyvesnis maišymasis vyksta aplink maišymo sparnuotę, ir mažiau intensyvus skysčio paviršiuje, todėl toks metodas yra mažiau tinkamas reguliuojant pH lygį, nes jis gali sukelti didesnius pH matavimų svyravimus dėl prastai ištirpusio reagento [2].



7 pav. Ašinis maišymas (a) ir radialinis maišymas (b)

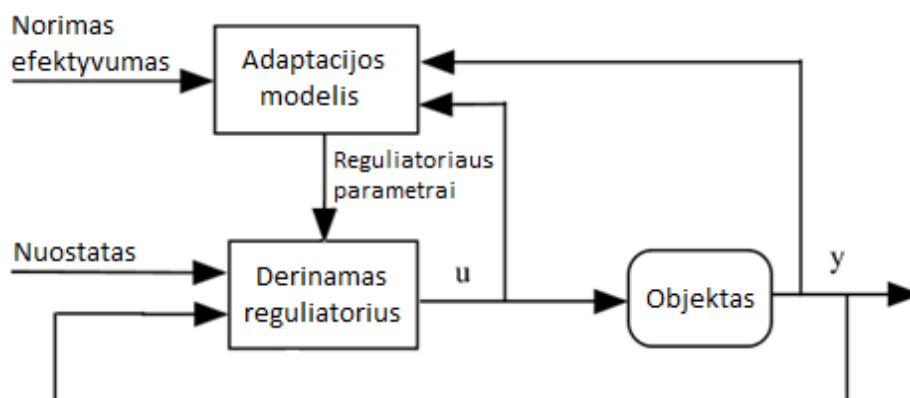
1.5 Tiekiamo reagento savybių įtaka pH reguliavimui

Idealiu pH reguliavimo atveju reagentas turi būti paduodamas tiksliai, patikimai, mažomis dozėmis. Pavyzdžiui reagento, kurio disociacijos konstanta yra artima užduotam tirpalo pH lygiui sumažina tiekimo tikslumo būtinybę. Reagento klampumas taip pat turėtų būti kuo mažesnis, kad būtų užtikrintas pilnas ir greitas reagento tirpimas tirpale. Nuo reagento klampumo taip pat priklauso maišymo įrangos darbas – esant klampesniai reagentui reikalingas intensyvesnis maišymas, kas reikalauja didesnių energijos sąnaudų [2].

1.6 Adaptyvaus valdymo analizė

Adaptyvus valdymas apima metodų visumą, kuri suteikia galimybę automatiškai derinti reguliatorius realiu laiku tam, kad būtų pasiektas arba palaikomas užduotas valdymo sistemos lygis, kuomet objekto dinaminio modelio parametrai yra nežinomi ir/arba jie laikui bėgant keičiasi.

Laikui bėgant valdomo objekto dinaminio modelio parametrai gali keistis nenuspėjamai. Tai gali vykti dėl aplinkos veiksnių pokyčių, arba jeigu netiesinėms sistemoms buvo pritaikyti supaprastinti tiesiniai modeliai (tuomet pokytis sistemos sąlygose gali nulemti kitokį tiesinį modelį nei numatyta). Tam, kad pasiekti ir palaikyti priimtina valdomos sistemos veikimą, kuomet modelio parametruose gali būti didelis kiekis nežinomų pokyčių, turi būti taikomas adaptyvusis valdymas.



8 pav. Adaptyvaus valdymo sistemos pavyzdys

Valdomo objekto dinaminis modelis gali būti identifikuotas iš objekto įėjimo ir išėjimo matavimų. Valdiklio derinimas yra atliekamas realiu laiku surenkant valdomo objekto matavimo duomenis ir įvertinant pokyčius. Skirtingos adaptyvios reguliavimo sistemos tarpusavyje skiriasi skirtingais būdais, t.y. kaip valdomo objekto informacija yra surenkama realiu laiku tam, kad valdiklio parametrai būtų pritaikyti prie esamų sąlygų [1].

1.7 Adaptyvaus valdymo sistemos palyginimas su klasikine grįžtamojo ryšio valdymo sistema

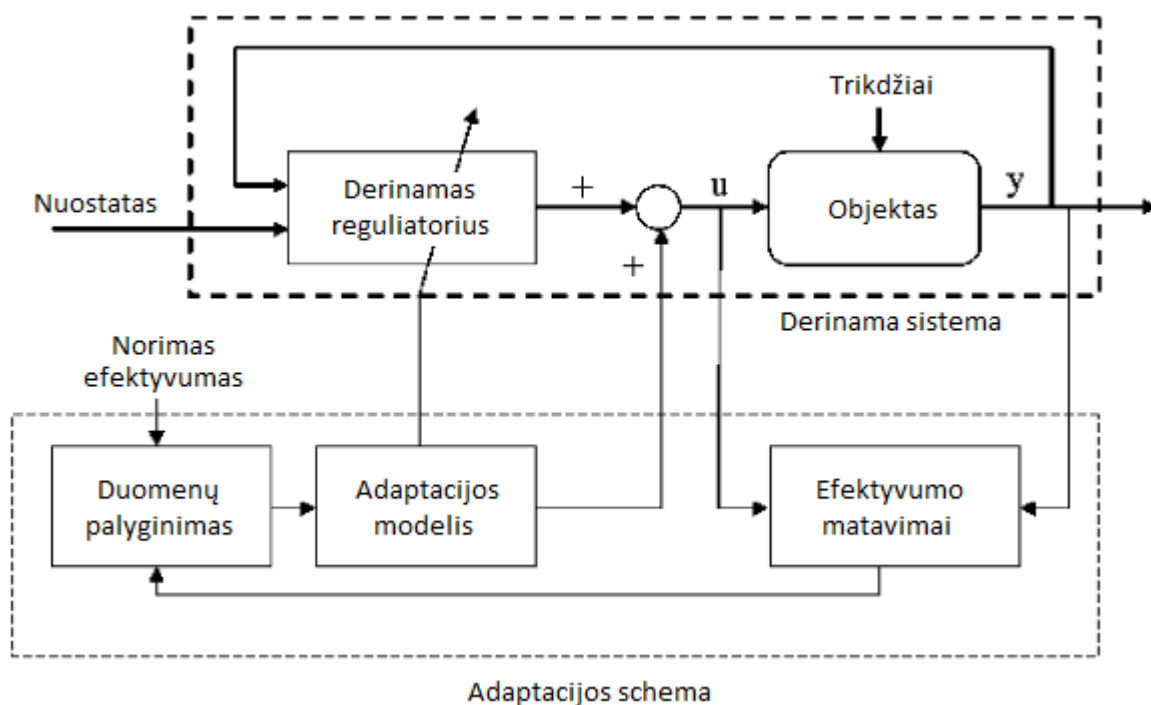
Nežinomi ir neišmatuojami proceso parametrų pokyčiai stipriai kenkia valdymo sistemų našumui. Dažnai šiuos parametrų pokyčius sukelia vidiniai arba išoriniai trikdžiai. Taigi trikdžiai, veikiantys valdymo sistemą, gali būti klasifikuojami taip:

1. Trikdžiai veikiantys valdomus kintamuosius;
2. Parametrų trikdžiai, kurie paveikia valdymo sistemos veikimo efektyvumą.

Klasikinėse valdymo sistemose grįžtamas ryšys dažniausiai yra naudojamas tam, kad būtų slopinami trikdžiai, kurie paveikia valdomus kintamuosius, o šie kintamieji atitinkamai pagal valdymo sistemos struktūrą ir valdymo efektyvumą yra grąžinami į užduotas vertes. Tam, kad pasiekti tai, reikia visų pirma išmatuoti valdomus kintamuosius, tuomet šiuos matavimus palyginti su užduota verte ir jų skirtumo signalą paduoti į reguliatorių, kuris atitinkamai sugeneruotų valdymo signalą.

Esant proceso parametrų trikdžiams, kad būtų pasiektas ir palaikomas užduotas valdymo sistemos veikimo efektyvumas, yra naudojamas panašus metodas kaip ir klasikinėse valdymo sistemose. Tokioje valdymo sistemoje yra matuojamas sistemos efektyvumo indeksas (angl. *Performance index*) – tai uždarnosios valdymo sistemos faktorius, kuris charakterizuojamas antrosios

eilės perdavimo funkcija, kuri leidžia kiekybiškai įvertinti sistemos veikimo efektyvumą slopinimu (angl. *In terms of „damping“*). Jeigu išmatuotasis efektyvumo indeksas neatitinka užduotojo efektyvumo indekso, tuomet jis yra perduodamas į adaptacijos mechanizmą. Toliau adaptacijos mechanizmo išėjimo signalas atitinkamai pakeičia reguliatoriaus parametrus tam, kad atitinkamai būtų pakeistas sistemos veikimo efektyvumas. Toliau yra pateikiama aprašytos adaptyvios valdymo sistemos blokinė schema (9 pav.).



9 pav. Adaptyvios valdymo sistemos veikimo pagrindas

Taigi adaptyvios valdymo sistemos apibrėžimas būtų toks:

Adaptyvi valdymo sistema įvertina tam tikrą valdymo sistemos efektyvumo indeksą per valdomo objekto įėjimo, būsenos ir išėjimo kintamuosius, taip pat per žinomus trikdžius. Tam, kad būtų palaikomas valdymo sistemos efektyvumo indeksas, pagal išmatuoto ir užduoto efektyvumo indekso skirtumą adaptacijos mechanizmas pakeičia reguliatoriaus parametrus.

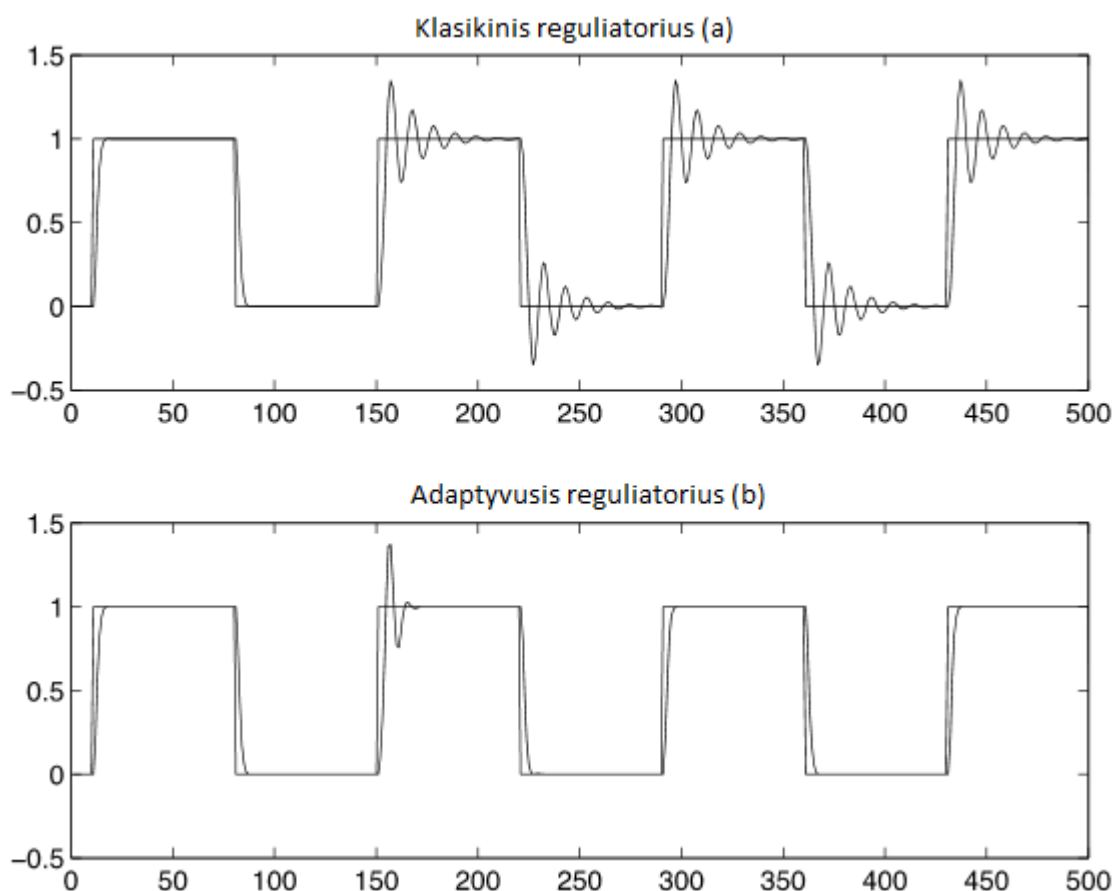
Pavyzdžiui esant tradicinei uždarai grįžtamojo ryšio valdymo sistemai, kuomet, valdomąjį kintamąjį veikia trikdys ir jeigu valdomas objektas turi nominalius parametrus pagal kuriuos yra sukurtas reguliatorius šiam objektui, tuomet šio valdomojo kintamojo svyravimai yra slopinami. Tačiau jeigu atsiranda šio valdomo objekto parametrų trikdžiai, tuomet valdomojo kintamojo slopinimas gali neprognozuojamai kisti. Tokiu atveju pridėjus adaptacijos grandinę, esant valdomo objekto parametrų trikdžiams sistemos valdomojo kintamojo slopinimas pagal grįžtamąjį ryšį gali būti palaikomas pastovus.

Iš to galima daryti išvadą, kad klasikinė reguliavimo sistema su grįžtamoju ryšiu yra orientuota į valdomojo signalo trikdžio šalinimą, o adaptyvi reguliavimo sistema yra labiau orientuota į valdomo objekto parametrų trikdžių įtakos valdomiems kintamiesiems šalinimą. Tai reiškia, kad adaptyvaus reguliatoriaus paskirtis yra rasti geriausias reguliatoriaus parametrų vertes.

Adaptyvi reguliavimo sistema gali būti atvaizduojama kaip hierarchinė sistema:

- 1 lygis: tradicinė grįžtamojo ryšio sistema;

- 2 lygis: adaptacijos kontūras.
- Taip pat praktikoje dažnai yra dar taikomas „stebėjimo“ lygis (3 lygis), kuriame yra tikrinama ar yra išpildytos sąlygos adaptacijos kontūrai.



10 pav. Reguliatorių palyginimas - fiksuotų parametrų reguliatorius (a) ir adaptyvus reguliatorius (b)

Iš 10 pav. matosi, kad esant objekto parametrų pokyčiams (kai $t=150$), naudojant klasikinį fiksuotų parametrų reguliatorių, yra gaunami žymiai didesni proceso išėjimo signalo nuokrypiai nuo nuostato, lyginant su adaptyviuoju reguliatoriumi [1].

Toliau yra pateikiama keletas adaptyvaus valdymo metodų.

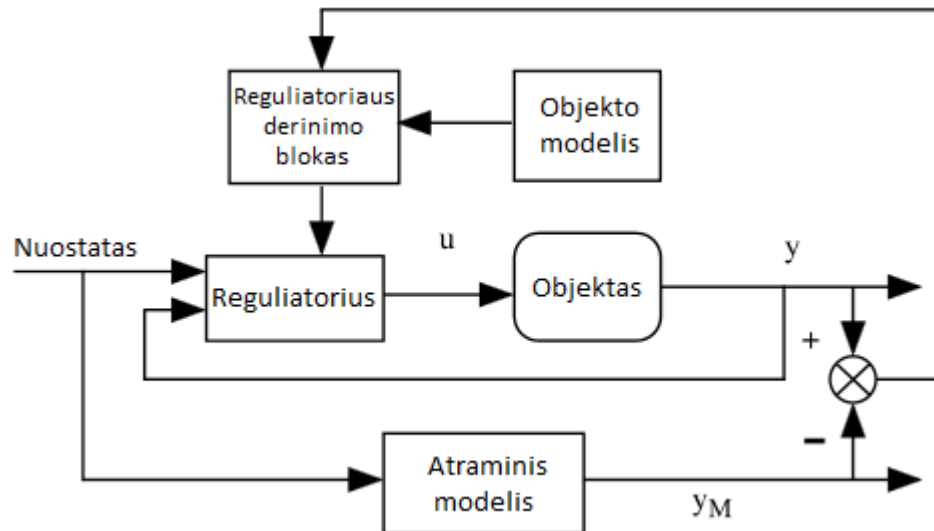
1.8 Tiesioginis adaptyvus valdymas

Daugeliu atveju norimas grįžtamojo ryšio kontūro sistemos našumas gali būti apibrėžtas pagal dinaminės sistemos charakteristiką, kuri gali būti įvardijama kaip užduotas uždaro kontūro sistemos elgesys. Šiuo atveju reguliatorius yra sukuriamas taip, kad duotajam objekto modeliui uždarojo kontūro sistema turi užduotos dinaminės sistemos charakteristikas. Toliau pateiktame paveiksle (9 pav.) atraminio modelio (angl. *Reference model*) blokas yra sistemos realizacija su užduotu norimu našumu.

Tokia reguliatoriaus schema yra sudaroma, nes:

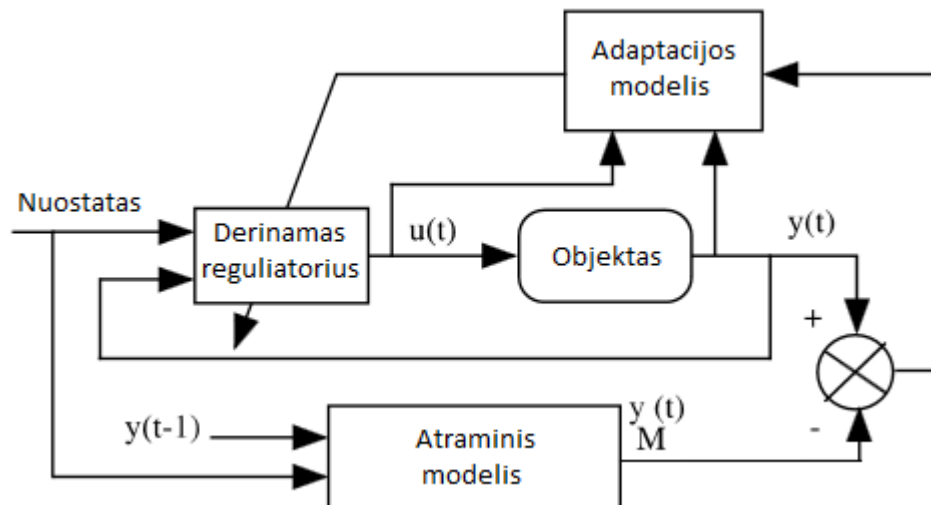
1. Paklaida tarp valdomo objekto išėjimo signalo ir atraminio modelio išėjimo signalo yra identiška ir lygi nuliui esant identiškoms pradinėms sąlygoms;

2. Pradinė paklaida išnyksta su tam tikra dinamika.



11 pav. Tiesinio regulatoriaus su atraminiu modeliu blokinė schema

Kuomet valdomo objekto parametrai yra nežinomi arba keičiasi laikui bėgant tam, kad pasiekti ir palaikyti norimą sistemos našumą, yra pritaikomas adaptyvaus valdymo metodas, kuris žinomas kaip adaptyvus valdymas su atraminiu modeliu (angl. *Model Reference Adaptive Control*), kuri yra pavaizduotas 12 pav.



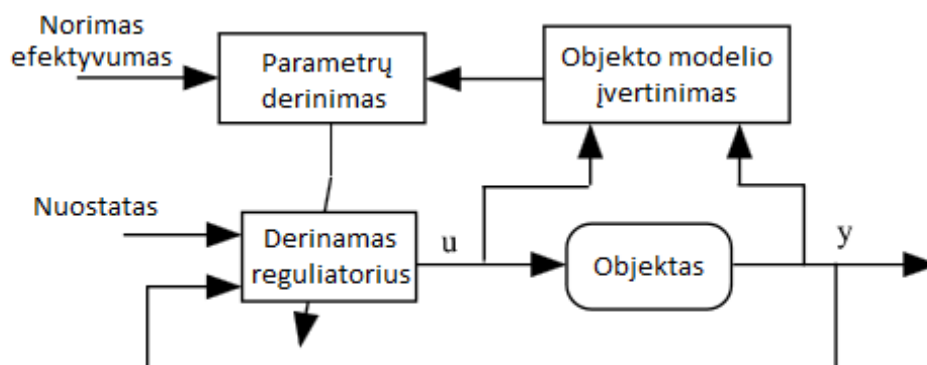
12 pav. adaptyvaus valdymo su atraminiu modeliu blokinė schema

Ši valdymo schema yra paremta valdomo objekto išėjimo ir atraminio modelio išėjimo skirtumo stebėjimu. Ši informacija yra naudojama adaptacijos mechanizme, kuris realiu laiku tiesiogiai derina valdiklio parametrus, kad sumažintų valdomo objekto ir modelio išėjimų paklaidą iki nulio [1].

1.9 Netiesioginis adaptyvus valdymas

Ši schema yra vadinama netiesiogine, nes regulatoriaus parametrų adaptacija yra vykdoma dvejomis pakopomis:

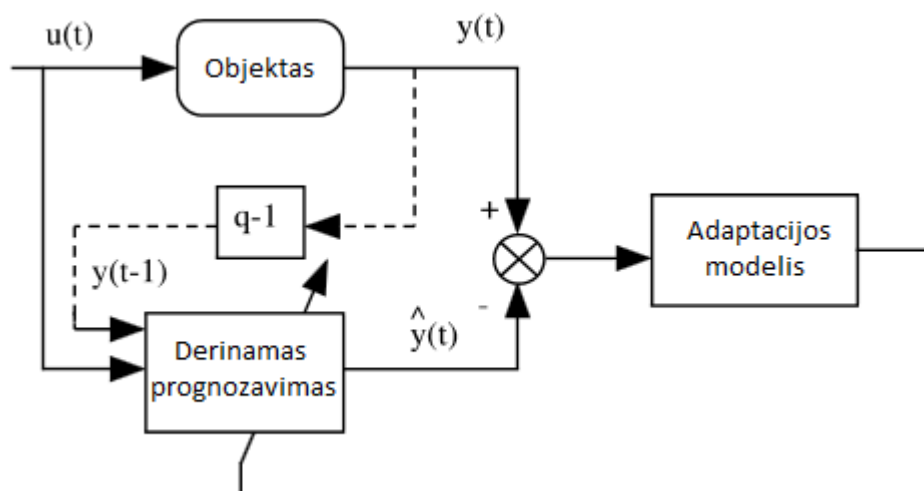
1. Lygiagrečiai (angl. *On-line*) įvertinami valdomo objekto parametrai;
2. Lygiagrečiai atliekami regulatoriaus parametrų skaičiavimai remiantis esamu įvertintu valdomo objekto modeliu.



13 pav. Netiesioginio valdymo blokinė schema

Šioje schemoje esamo valdomo objekto modelio parametrai yra prilyginami realiams parametrams ir iš jų yra apskaičiuojami regulatoriaus parametrai.

Netiesioginio adaptyvaus valdymo schema suteikia didelę valdymo kombinacijų ir parametrų įvertinimo metodų įvairovę. Tam, kad geriau suprasti kaip ši netiesioginio adaptyvaus valdymo schema veikia, reikia detaliau išnagrinėti valdomo objekto modelio lygiagretaus (angl. *On-line*) įvertinimo schemą (14 pav.)



14 pav. Lygiagretaus objekto parametrų įvertinimo schema

Čia pagrindinė idėja yra sukurti paderinamą valdomo objekto išėjimo prognozavimo sistemą (angl. *Adjustable predictor*), kuri turėtų galimybę naudoti senesnius valdomo objekto matavimus ir palyginti prognozuojamą išėjimą su išmatuotu išėjimu. Paklaida tarp valdomo objekto išėjimo ir prognozuojamo išėjimo (dar vadinama prognozavimo paklaida) yra naudojama parametrų adaptacijos

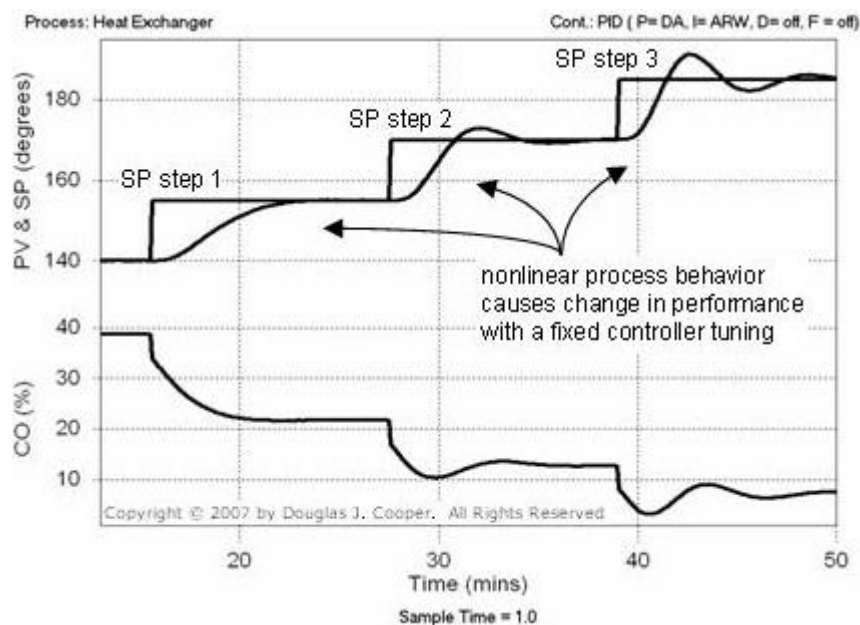
algoritme, kuris sulig kiekviena iteracija pakoreguoja paderinamos prognozavimo sistemos parametrus tam, kad būtų sumažinta prognozavimo paklaida [1].

1.10 Adaptyvusis valdymas naudojant stiprinimo numatymą

Vienas dažniausiai taikomų adaptyviojo valdymo metodų yra stiprinimo numatymas (angl. *Gain-scheduling*). Šis metodas procesų valdyme naudojamas gana plačiai, pavyzdžiui aviacijos procesų valdyme, vėjo turbinų valdyme ir panašiai.

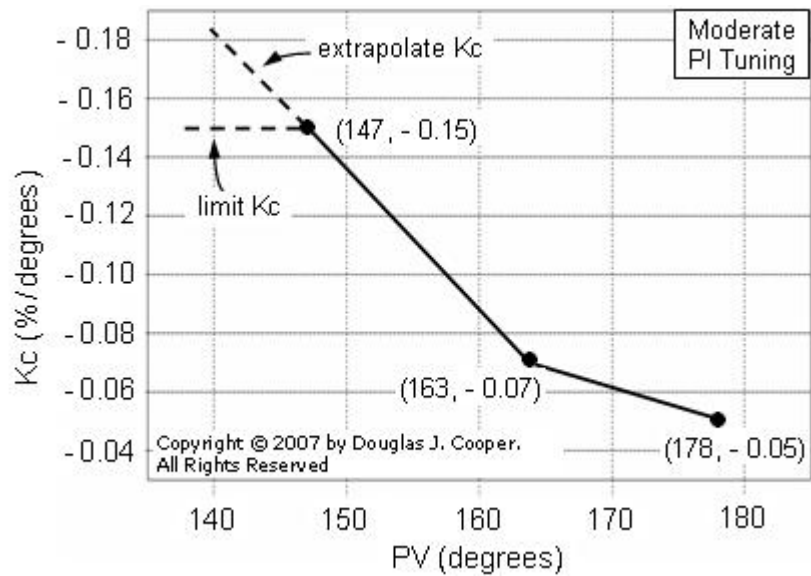
Valdymas naudojant stiprinimo numatymą yra pasiekiamas naudojant interpoliaciją tarp tiesinių reguliatorių rinkinio, skirtų atitinkamam valdymo objekto ištiesinimo rinkiniui keliuose darbo taškuose. Interpoliacija yra grindžiama išoriniais, lėtai kintančiais procesų parametrais, kuriuos naudojant galima užfiksuoti valdomojo objekto netiesiškumus. Tai pritaikius yra gaunama tiesinė reguliavimo sistema, kurios stiprinimo parametrai yra koreguojami (numatomi) kaip išorinių numatytų parametrų funkcija. Kadangi tokia reguliavimo sistema yra kuriama remiantis tiesiniu priartėjimu prie netiesinio valdomojo objekto parametrų, todėl kiekviename pakitusiame darbo taške gali būti užtikrinamas grįžtamojo ryšio sistemos stabilumas ir efektyvumas [8].

Pavyzdžiui keičiant sistemos nuostatą didesniame diapazone gali atsirasti netolygus proceso vertės perėjimas į nustatytą tašką (15 pav.).

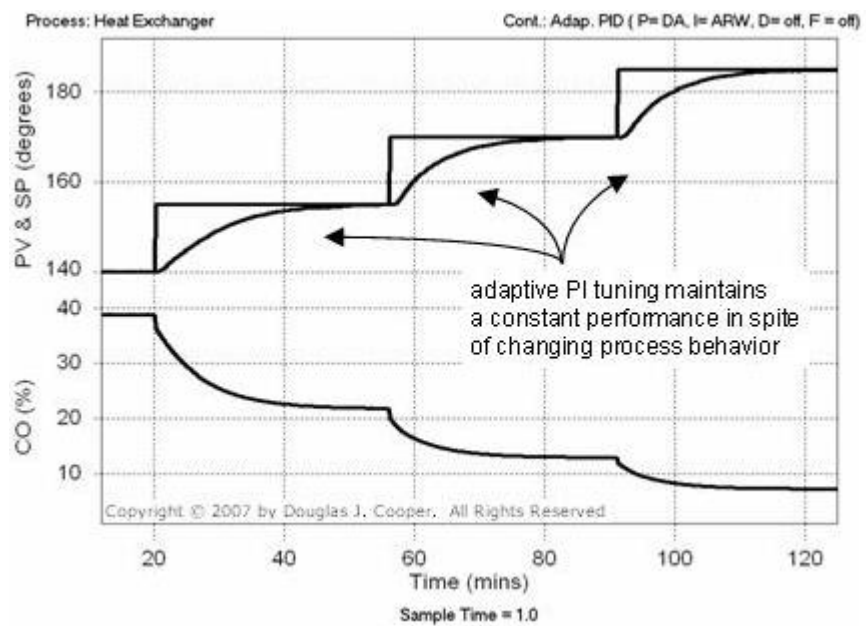


15 pav. Proceso reakcija į nuostato pokytį naudojant klasikinį PI reguliatorių

Pateiktame pavyzdyje matosi, kad pakeitus nuostatą iš 140 į 155, proceso kintamasis jį pasiekia per ilgesnį laiko tarpą, tačiau be perreguliavimo. Kai nuostatas pakeičiamas iš 155 į 170, proceso kintamasis pasiekia nuostatą jau per trumpesnį laiką su atsiradusiu perreguliavimu. Toliau didinant nuostatą iš 170 į 185 didėja perreguliavimo amplitudė ir išauga reguliavimo laikas dėl atsiradusių proceso kintamojo svyravimų. Tokia netiesinio proceso savybė blogina reguliavimo kokybę naudojant klasikinį PI reguliatorių. Reguliavimo kokybę galima pagerinti naudojant adaptyvųjų PI reguliatorių. Tam reikia rasti reguliatoriaus parametrus, kurie tinka šiems darbo taškams, tuomet šiuos parametrus interpoliuoti, kad parametrai būtų kintantys šiose ribose (16 pav.).



16 pav. Interpoliuojamas regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_c pagal darbo taškų pokyčius



17 pav. Proceso reakcija į nuostato pokytį naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių

Atlikus regulatoriaus parametrų derinimą prie skirtingų darbo taškų ir interpoliaciją, keičiant nuostatą tose pačiose ribose kaip ir prieš tai, yra gaunama geresnė reguliavimo kokybė, kur nebėra proceso kintamojo perreguliavimo ir kintančio reguliavimo laiko (17 pav.) [9].

Kaip matosi iš pateiktų pavyzdžių, egzistuoja keletas valdymo sistemų struktūrų, kurios gali būti pasirenkamos pagal objekto savybes ir turimą informaciją apie valdomą objektą.

2. pH reguliavimo sistemos modelio sudarymas

2.1 Modelio aprašymas

2.1.1 Proceso modelio diferencialinės lygtys

Bioreaktoriaus kultivavimo terpės tūris aprašomas įvertinant paduodamo substrato srautą, rūgštis ir šarmo tirpalo srautus:

$$\frac{dV}{dt} = F_S + F_A + F_B \quad (4)$$

Čia F_S – substrato pamaitinimo tirpalo srautas,
 F_A – rūgštis tirpalo srautas, skirtas pH reguliavimui,
 F_B – paduodamo šarmo tirpalo srautas, skirtas pH reguliavimui.

Biomosės koncentracija kultivavimo terpėje priklauso nuo biomasės augimo spartos, biomasės koncentracijos kultivavimo terpėje, ir substrato, rūgštis ir šarmo tirpalų srautų [3]:

$$\frac{dx}{dt} = \mu x - \frac{F_S + F_A + F_B}{V} \cdot x \quad (5)$$

Čia μ - biomasės augimo greitis,
 x - biomasės koncentracija kultivavimo terpėje,
 V – kultivavimo terpės tūris.

Aprašant vandenilio jonų koncentracijos kitimas kultivavimo terpėje yra įvertinami tiek F_S , tiek F_A ir F_B srautais paduodamų tirpalų vandenilio jonų koncentracijos: Jeigu paduodamo tirpalo jonų koncentracija mažesnė nei kultivavimo terpės jonų koncentracija, tuomet dėl šio tirpalo kultivavimo terpės jonų koncentracija ims mažėti ir atvirkščiai – jeigu paduodamo tirpalo jonų koncentracija bus didesnė, kultivavimo terpės jonų koncentracija didės. Kuo didesnis tirpalų pH skirtumas su kultivavimo terpės pH, tuo didesnę įtaką turi atitinkamas tirpalas [3].

$$\frac{dC_{H^+}}{dt} = (\alpha_1 \mu x + \alpha_2 x) + \frac{F_S \cdot (C_{SH^+} - C_{H^+})}{V} + \frac{F_A \cdot (C_{AH^+} - C_{H^+})}{V} + \frac{F_B \cdot (C_{BH^+} - C_{H^+})}{V} \quad (6)$$

Čia α_1, α_2 – identifikuoti parametrai, kurių vertės pateikiamos 2 lentelėje [6],
 C_{H^+} - kultivavimo terpės vandenilio jonų koncentracija,
 C_{SH^+} - paduodamo maitinimo tirpalo vandenilio jonų koncentracija;
 C_{AH^+} - rūgštis tirpalo vandenilio jonų koncentracija.
 C_{BH^+} - šarmo tirpalo vandenilio jonų koncentracija.

2 lentelė. Identifikuotų parametų vertės

Identifikuotas parametras	Parametų vertės	
	I fazė	II fazė
α_1	$0.422 \cdot 10^{-7}$	$0.4088 \cdot 10^{-7}$
α_2	$0.011 \cdot 10^{-7}$	$0.0179 \cdot 10^{-7}$

Substrato koncentracijos pokytis kultivavimo terpėje [11]:

$$\frac{dS}{dt} = F_s \cdot \frac{S_0}{V} - \frac{(F_s + F_A + F_B) \cdot S}{V} - q_s x \quad (7)$$

Čia S_0 – substrato koncentracija pamaitinimo tirpale;
 $q_s = \mu/Y_{xs}$;
 Y_{xs} – biomasės/substrato išeigos koeficientas, kuris lygus 0.5.

2.1.2 Kitos išraiškos

Santykinis biomasės augimo greitis modeliuojamas naudojant Mono dėsnį įvertinant substrato inhibiciją [11]:

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{k_s + S} \cdot \frac{k_i}{k_i + S} \quad (8)$$

Čia $\mu_{max} = 0.7$ (maksimalus biomasės augimo greitis);
 $k_s = 0.05$ (Mono konstanta);
 $k_i = 20$ (inhibicijos konstanta),
 S – substrato koncentracija kultivavimo terpėje.

Degonies suvartojimo greitis modeliuojamas įvertinant kultivavimo terpės tūrį, biomasės koncentraciją, santykinį biomasės augimo greitį ir identifikuotus parametrus [3]:

$$OUR = \beta_1 \mu x V + \beta_2 x V \quad (9)$$

Čia β_1, β_2 – identifikuoti parametrai, kurių vertės pateikiamos 3 lentelėje [6].

3 lentelė. Identifikuotų parametų vertės

Identifikuotas parametras	Parametų vertės	
	I fazė	II fazė
β_1	0,8646	1,47
β_2	0,018	0,0038

2.2 Sudarytas modelis Simulink aplinkoje

Sudarant modelį buvo laikomasi realios sistemos apribojimų. Bioreaktoriaus ir jo valdymo sistemos modelis buvo sudarytas naudojant *MATLAB Simulink* programinę įrangą. Modelyje yra sudaromas valdomojo biomasės kultivavimo proceso blokas, kuriame diferencialinėmis lygtimis yra aprašomas šio proceso tūrio, biomasės koncentracijos, vandenilių jonų koncentracijos ir substrato koncentracijos priklausomybės. Tam, kad būtų palaikomas maksimalus santykinis biomasės prieaugio greitis ir gautūsi maksimali biomasės išeiga yra suformuojamas substrato pamaitinimo srauto profilis. Toliau sudaromi šarmo ir rūgšties tirpalų dozavimo blokai, klasikinio PI ir adaptyviojo PI reguliatoriaus blokai.

2.2.1 Modelio prielaidos ir apribojimai

Sudarant modelį buvo laikomasi tokių prielaidų:

- Substrato, rūgšties ir bazės tirpalų siurblių perdavimo funkcijos nevertinamos;
- Tūrio jutiklio delsa nevertinama;
- Modelio pradinės kintamųjų vertės apibrėžiamos 4 lentelėje;
- Modelio parametrų verčių ribos apibrėžiamos 5 lentelėje;

4 lentelė. Modelio pradinės kintamųjų vertės

Pavadinimas	Žymėjimas	Vertė
Pradinis kultivavimo terpės tūris	V_0	5 L
Pradinė biomasės koncentracija kultivavimo terpėje	x_0	0.2 g/L
Pradinė vandenilio jonų koncentracija kultivavimo terpėje	C_{H^+}	10^{-7} mol/L
Pradinė substrato koncentracija kultivavimo terpėje	S_0	1 g/L

5 lentelė. Modelio parametrų verčių apribojimai

Pavadinimas	Žymėjimas	Min. vertė	Maks. vertė
Substrato pamaitinimo srautas	F_s	0	0.6 L/val.
Rūgšties tirpalo srautas	F_A	0	0.4 L/val.
Bazės tirpalo srautas	F_B	0	0.4 L/val.
Kultivavimo terpės tūris	V	0	10 L

2.2.2 Modelio sandara

Modeliavimo diskretizavimo žingsnis parenkamas lygus 10^{-3} . Galutinė sudaryto modelio schema pateikiama priede nr. 1. 1 pav.

Modelį sudaro 9 blokai:

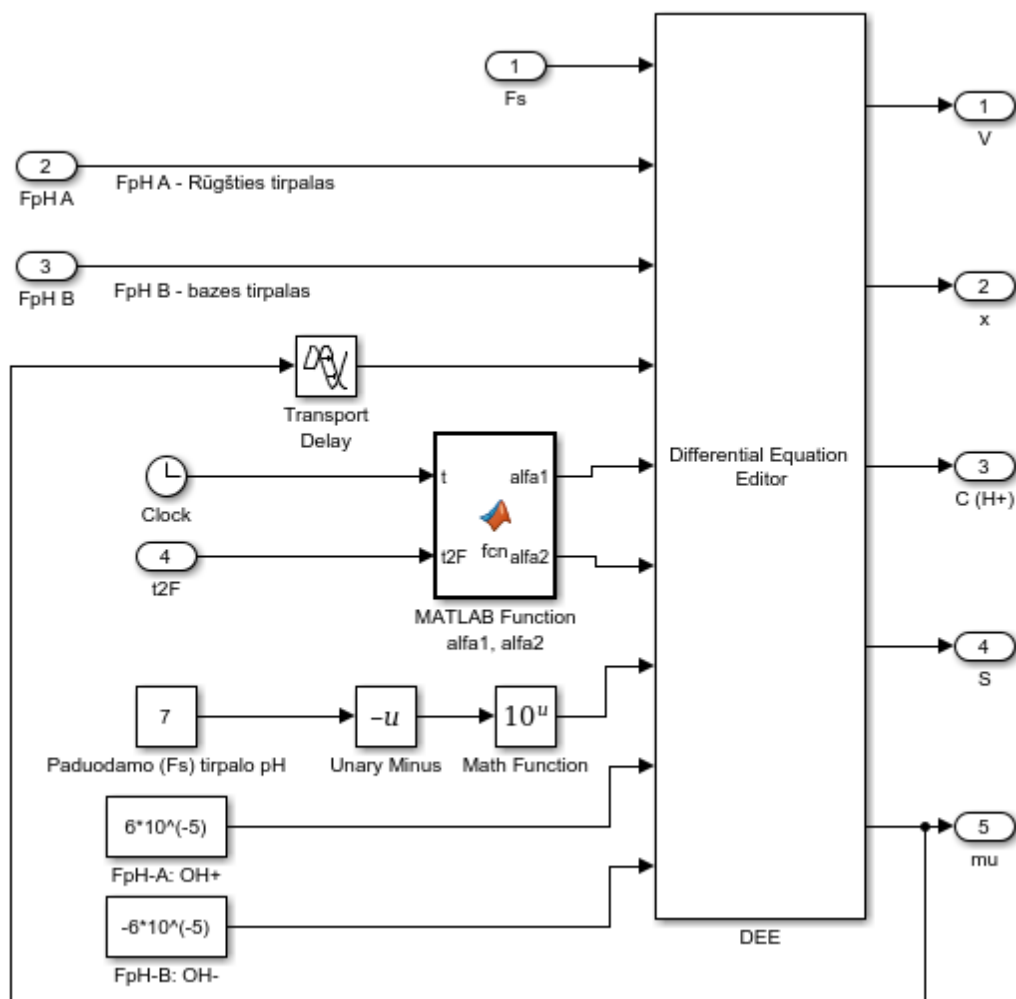
1. Proceso blokas;

2. Substrato srauto formavimo blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 2 pav.);
3. Rūgšties tirpalo dozavimo blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 3 pav.);
4. Bazės tirpalo dozavimo blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 4 pav.);
5. Klasikinis PI reguliatorius (26 pav.);
6. Adaptyvusis PI reguliatorius (31 pav.);
7. Adaptyviojo PI reguliatoriaus adaptacijos parametrų optimizavimo blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 5 pav.);
8. Deguonies suvartojimo apskaičiavimo blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 6 pav.);
9. pH jutiklio blokas (schema pateikiama priede nr. 1, 7 pav.).

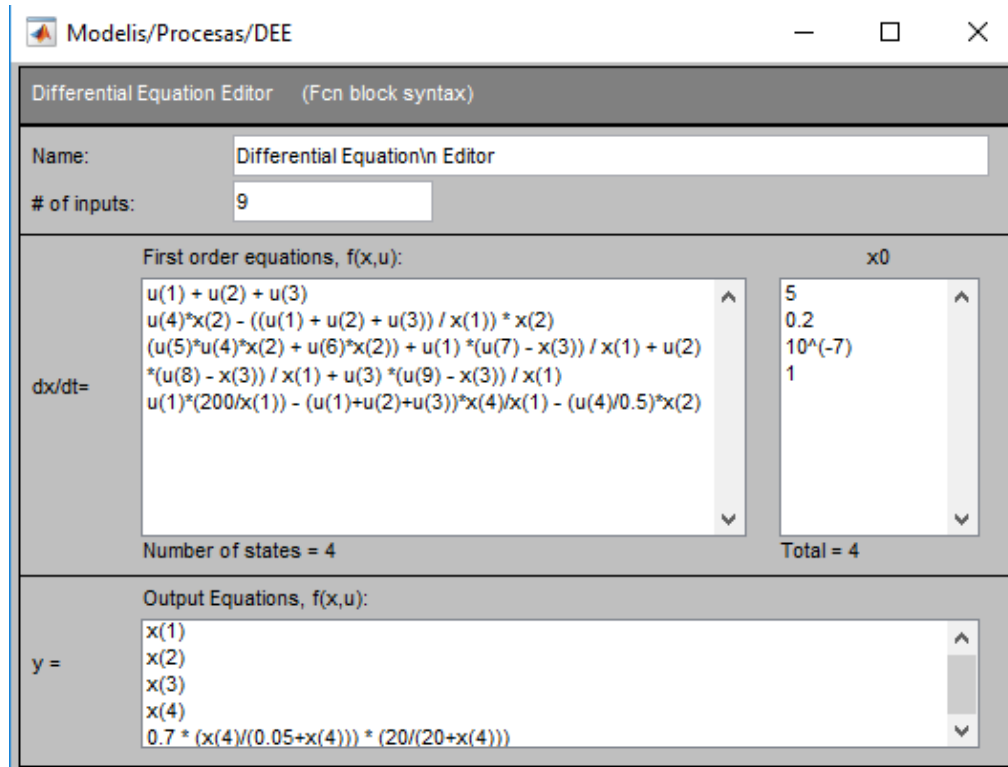
Proceso bloke (18 pav.) yra aprašomas valdomasis procesas, kurio savybes aprašo diferencialinės lygtys (4), (5), (6) ir (7). Taip pat čia yra formuojamas santykinio biomasės prieaugio greičio išėjimo signalas, aprašomas pagal (8) lygtį. Šis blokas turi 4 įėjimo signalus, į kuriuos yra paduodami šie signalai: substrato srautas (F_S), rūgšties tirpalo srautas pH reguliavimui (F_{pH_A}), bazės tirpalo srautas (F_{pH_B}) ir proceso antrosios fazės pradžios laikas (t_{2F}). Šio bloko išėjimo signalus sudaro 5 signalai: tiriamos terpės tūris (V), biomasės koncentracija (x), vandenilio jonų koncentracija (C_{H^+}), substrato koncentracija tiriamoje terpėje (S) ir santykinis biomasės prieaugio greitis (μ).

Proceso bloko viduje yra diferencialinių lygčių redaktorius *DEE* (19 pav.), ties kuriuo yra sudarytas santykinio biomasės prieaugio greičio (μ) grįžtamasis ryšys. Prie *DEE* signalų įėjimų dar yra priskirti α_1 ir α_2 , kurie yra pakeičiami iš pirmosios fazės į antrosios fazės vertes, proceso laikui pasiekus antrosios fazės pradžios laiką (t_{2F}), panaudojant Matlab funkcijų bloką (*MATLAB_Function_alfa1_alfa2*). Šio bloko veikimas aprašomas kodu, pateiktu priede nr. 2.

6 lentelėje pateikti diferencialinių lygčių redaktoriaus (*DEE*) bloko signalų žymėjimų atitikmenys. 7 lentelėje pateikiami diferencialinių lygčių atitikmenys ir šiomis lygtimis aprašomų dydžių pradinės vertės.



18 pav. Sudaryto modelio proceso blokas



19 pav. Sudaryto modelio DEE bloko aprašymas

6 lentelė. Simulink DEE bloko kintamųjų žymėjimų atitikmenys ir paaiškinimai

Modelio signalų įėjimai		
Simulink DEE simbolis	Dydis	Paaiškinimas
u(1)	F_S	Paduodamo maitinimo tirpalo srautas
u(2)	F_A	pH reguliavimo tirpalo srautas (rūgšties tirpalas)
u(3)	F_B	pH reguliavimo tirpalo srautas (šarmo tirpalas)
u(4)	μ	Biomasės augimo greitis
u(5)	α_1	Identifikuotas parametras
u(6)	α_2	Identifikuotas parametras
u(7)	C_{SH^+}	Paduodamo maitinimo tirpalo vandenilio jonų koncentracija
u(8)	C_{AH^+}	pH reguliavimo tirpalo vandenilio jonų koncentracija
u(9)	C_{BH^+}	pH reguliavimo tirpalo vandenilio jonų koncentracija

7 lentelė. Simulink DEE bloko diferencialinės lygtys

Diferencialinės lygtys			
Simulink DEE simbolis	Diferencialinė lygtis	Pradinis lygis	Paaiškinimas
x(1)	dV/dt	5 L	Kultivavimo terpės tūris
x(2)	dx/dt	0.2 g/L	Biomasės koncentracija kultivavimo terpėje
x(3)	dC_{H^+}/dt	10^{-7} mol/L	Vandenilio jonų koncentracija kultivavimo terpėje
x(4)	dS/dt	1 g/L	Substrato koncentracija kultivavimo terpėje

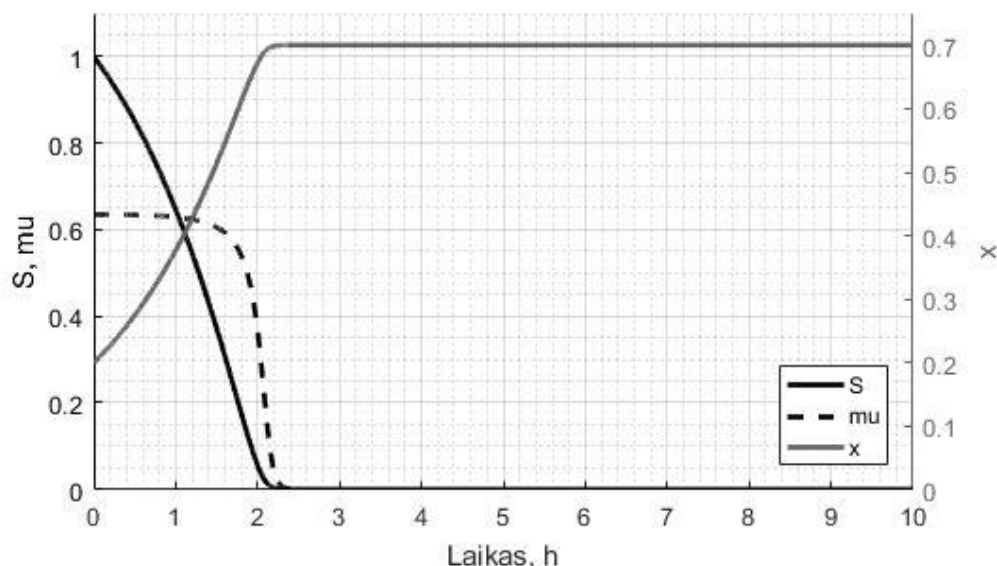
Substrato srauto laiko profilio kitimo aprašymui yra panaudojamas „MATLAB Function F_S “ blokas. Šio bloko aprašymas pateikiamas priede nr. 3. Čia F_S profilį siekiama parinkti tokį, kad būtų palaikoma santykinė biomasės prieaugio sparta maksimali (duomenys parenkami iš 20 pav.):

$$F_S = \frac{x_0 \cdot V_0 \cdot e^{\mu_0(t-t_0)}}{S_0} \quad (10)$$

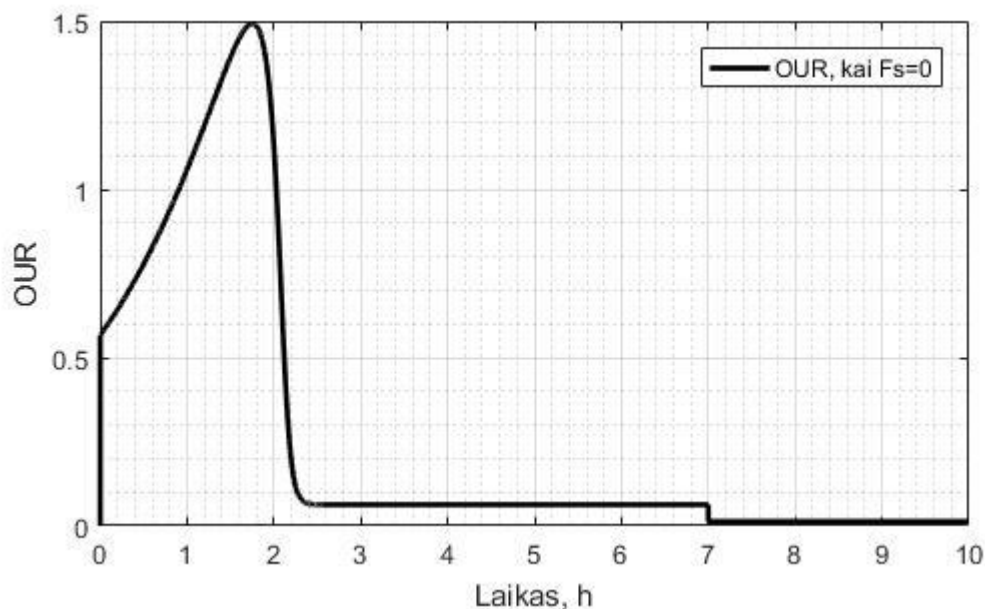
Čia x_0 – biomasės koncentracija laiko momentu t_0 ;
 V_0 – kai F_S ir F_{pH} nekinta, parinktas lygis yra lygus 5.00 L;
 μ_0 – parinkta vertė (0,63), kuri gaunama laiko momentu $t_0 = 0$ h;
 S_0 – substrato koncentracija pamaitinimo tirpale.

2.2.3 Modelio kintamieji

Toliau yra pateikiamos biomasės koncentracijos kultivavimo terpėje, substrato koncentracijos kultivavimo terpėje, santykinio biomasės prieaugio greičio ir deguonies suvartojimo greičio kitimo grafikai, kuomet substrato tirpalo srautas (F_S) lygus 0, rūgšties ir šarmo tirpalų srautai ($F_{A,B}$) lygūs nuliui (20 pav., 21 pav.).



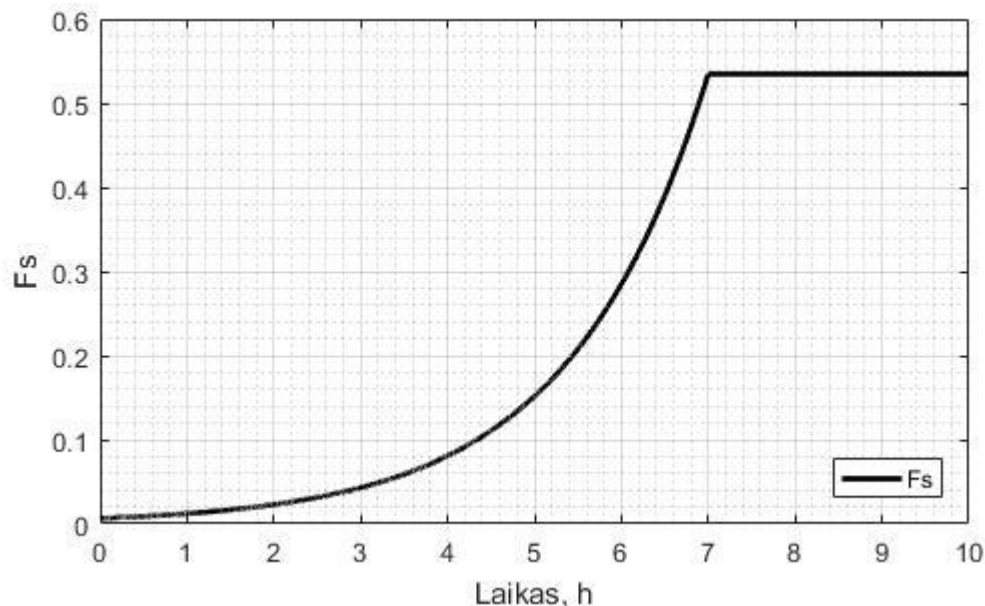
20 pav. Biomasės koncentracija (x), substrato koncentracija (S) ir biomasės prieaugio greitis (μ), kai $F_S=0$; $F_{A,B}=0$



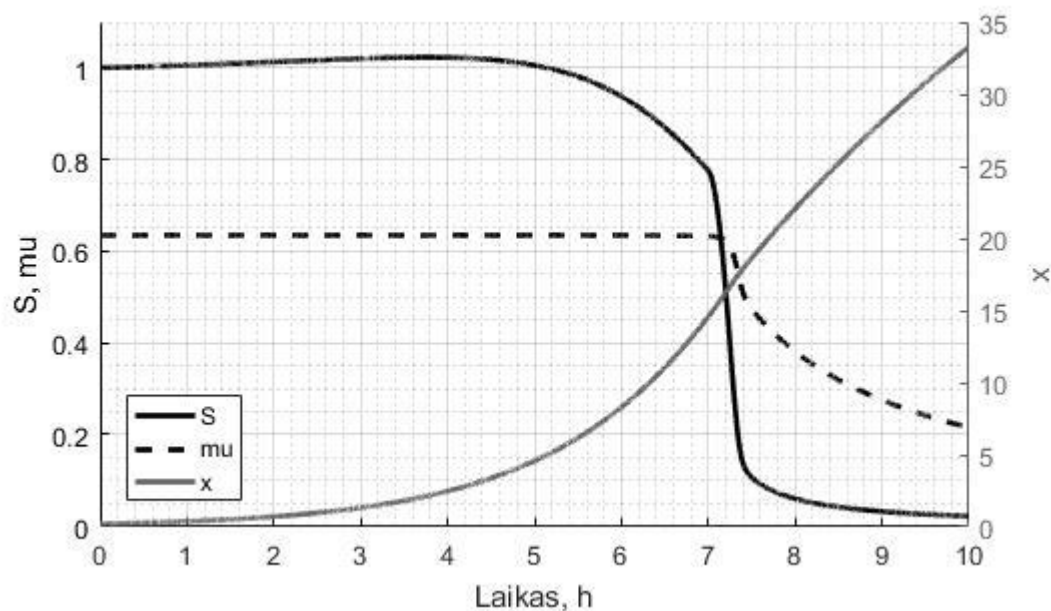
21 pav. OUR, kai $F_S=0$; $F_{A,B}=0$

Čia matosi, kad nesant pamaitinimo srautui ($F_S=0$), kuris įneštu substrato į kultivavimo terpę, substrato lygis sumažėja iki 0 nuo pradinio lygio per 2.1 val. Dėl to nukrinta santykinis biomasės prieaugio greitis iki nulio, o biomasės koncentracija daugiau nei 0,7 nebeišauga. Sumažėjus substrato koncentracijai sumažėja ir deguonies suvartojimo greitis (angl. *Oxygen uptake rate* – OUR).

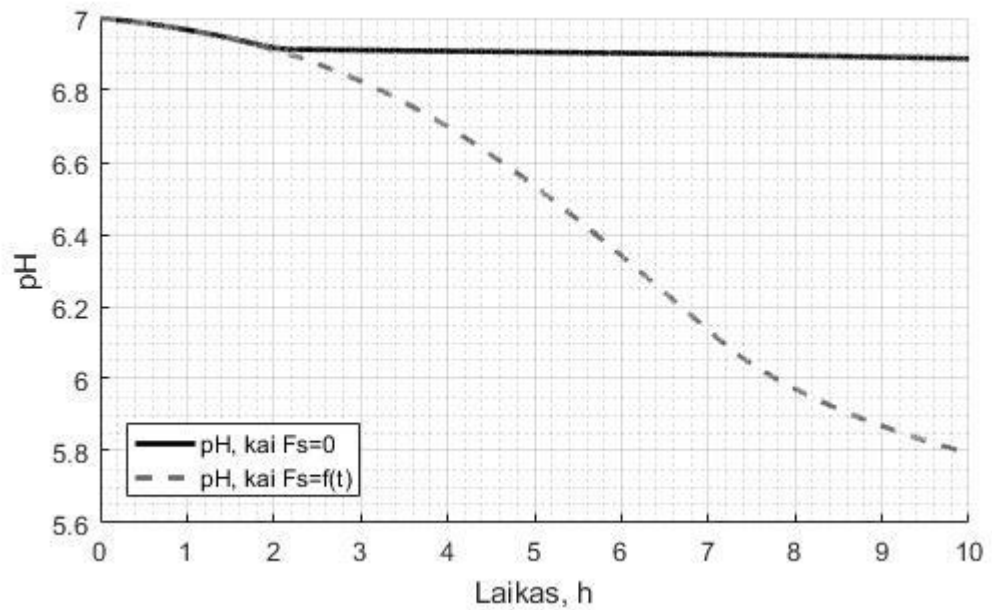
Toliau yra pateikiamos biomasės koncentracijos kultivavimo terpėje, substrato koncentracijos kultivavimo terpėje, santykinio biomasės prieaugio greičio ir pH lygio kitimo grafikai, kuomet substrato tirpalo srautas (F_s) kinta pagal „MATLAB Function F_s “ bloke aprašytą substrato srauto profilį laiko ašyje, o rūgšties ir bazės tirpalų srautai (F_A ir F_B) lygūs nuliui, t.y. procesas nėra reguliuojamas.



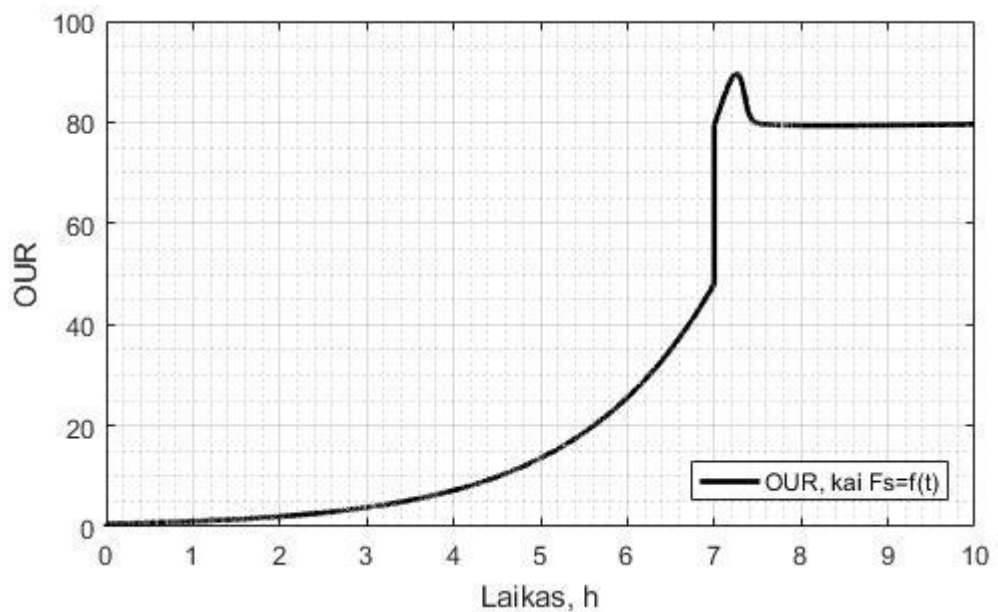
22 pav. Substrato tirpalo srauto F_s profilis laiko ašyje pagal „MATLAB Function F_s “ bloko aprašymą ($F_s = f(t)$)



23 pav. Biomasės koncentracija (x), substrato koncentracija (S), ir biomasės prieaugio greitis (μ), be reguliavimo, kai $F_s = f(t)$;



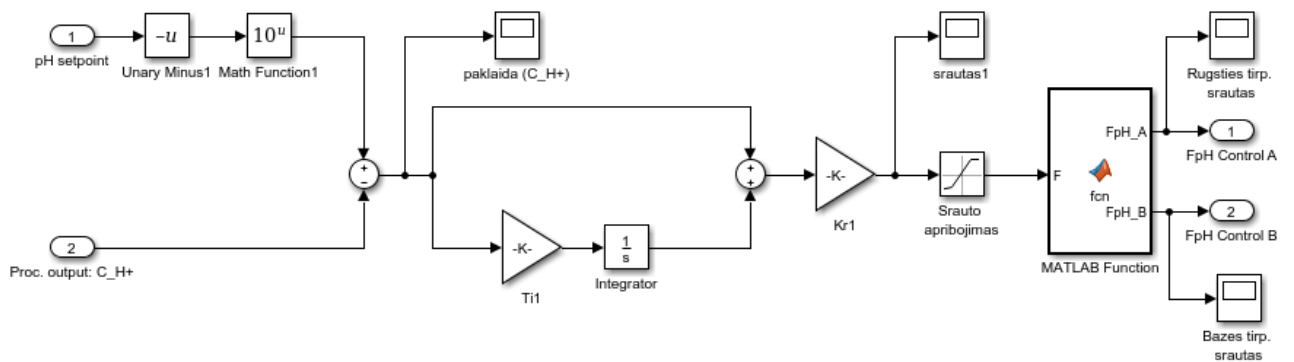
24 pav. pH lygio kitimas, kai $F_s=0$ ir kai $F_s = f(t)$; $F_{A,B}=0$



25 pav. Deguonies suvartojimo greitis, kai $F_s = f(t)$; $F_{A,B}=0$

Čia esant suformuotam substrato F_s srautui, substrato koncentracija kultivavimo terpėje pirmojoje proceso fazėje yra palaikoma apie 1. Tačiau pasiekus antrąją fazę substrato koncentracija iš lėto krinta iki 0. Taip pirmosios fazės metu yra palaikomas maksimalus biomosės prieaugis ($\mu = 0.63$), o biomosės koncentracija proceso pabaigoje (kai $t=10$) išauga iki 33 g/L. Pasiekus antrąją fazę deguonies poreikis išauga iki 80 g/L.

2.2.4 Valdymo blokų sudarymas. Klasikinis PI reguliatorius



26 pav. Sudarytas klasikinio PID reguliatoriaus blokas

Čia “Matlab function” bloke aprašomas rūgšties ir šarmo dozavimas pagal gaunamą reguliatoriaus signalą:

```
function [FpH_A, FpH_B] = fcn(F)

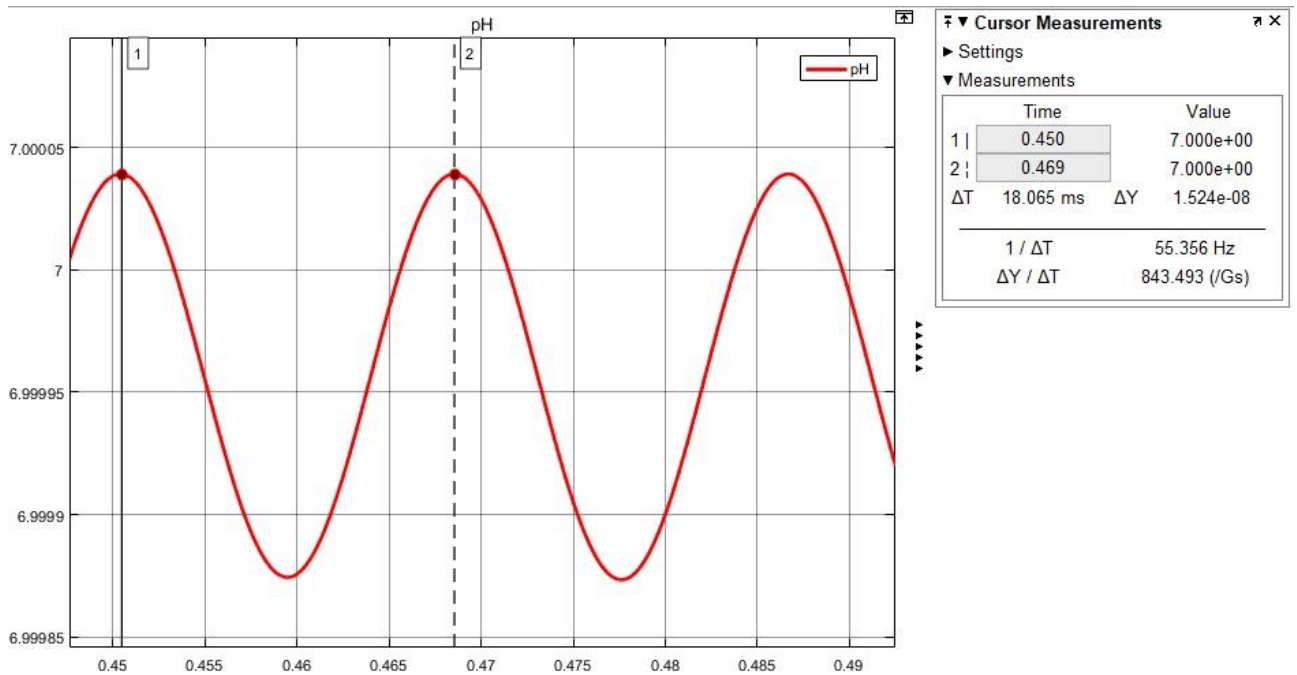
if F>=0
    FpH_B=F;
    FpH_A=0;
else
    FpH_A=-F;
    FpH_B=0;
end
```

Šio klasikinio PI reguliatoriaus algoritmas aprašomas taip:

$$u(t) = K_r \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (11)$$

- Čia $u(t)$ – reguliatoriaus išėjimo signalas;
 $e(t)$ – reguliuojamo parametro nuokrypa nuo nuostato taško, $e(t) = y_{nuost}(t) - y(t)$;
 K_r – reguliatoriaus stiprinimo koeficientas;
 T_i – integravimo laiko pastovioji;
 $y(t)$ – proceso išėjimo signalas;
 $y_{nuost}(t)$ – proceso išėjimo signalo nuostatas.

Pradiniai K_r ir T_i koeficientai parenkami derinant Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu. Nustatytas ribinis stiprinimo koeficientas, kuomet yra gaunami bioreaktoriaus neslopstantys pH lygio svyravimai: $K_u = -6.258 \cdot 10^7$



27 pav. Gauti neslopstantys pH lygio svyravimai, kai $K_u = -6.258 \cdot 10^7$

Iš pH lygio svyravimo (27 pav.) nustatomas ribinis svyravimų periodas T_u :

$$T_u = 1.807 \cdot 10^{-2} h$$

Toliau pagal 8 lentelės duomenis apskaičiuojami klasikinio PI reguliatoriaus parametrai.

$$K_r = \frac{K_u}{2.2} = \frac{-6.258 \cdot 10^7}{2.2} = -2.845 \cdot 10^7$$

$$T_i = \frac{T_u}{1.2} = \frac{5.841 \cdot 10^{-3} h}{1.2} = 1.505 \cdot 10^{-2} h$$

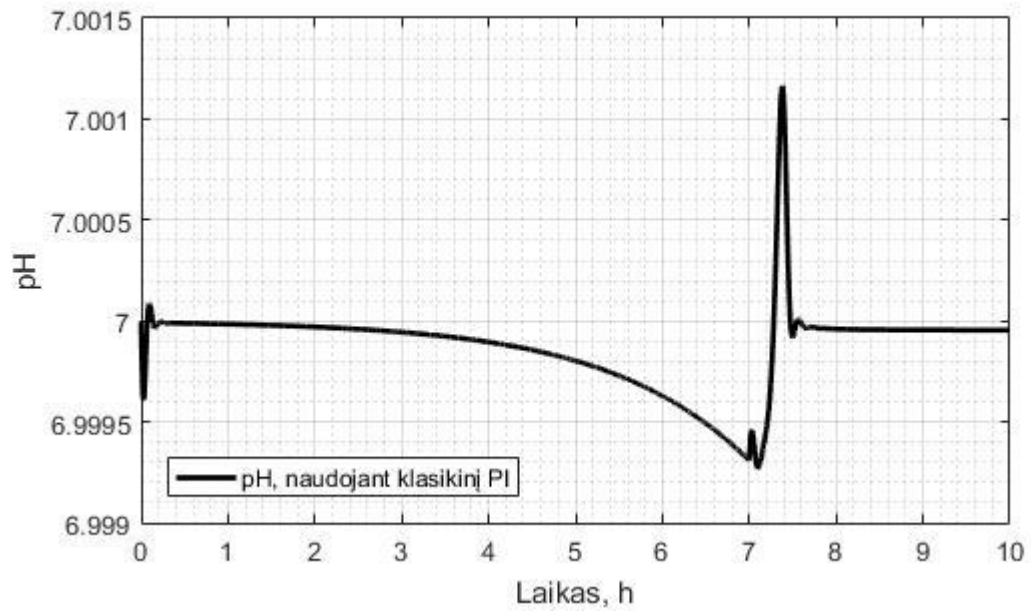
8 lentelė. Reguliatorių parametrų nustatymas Ziegler-Nichols dažninės reakcijos metodu

Regulatorius	K_r	T_i	T_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2.2$	$T_u/1.2$	-
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

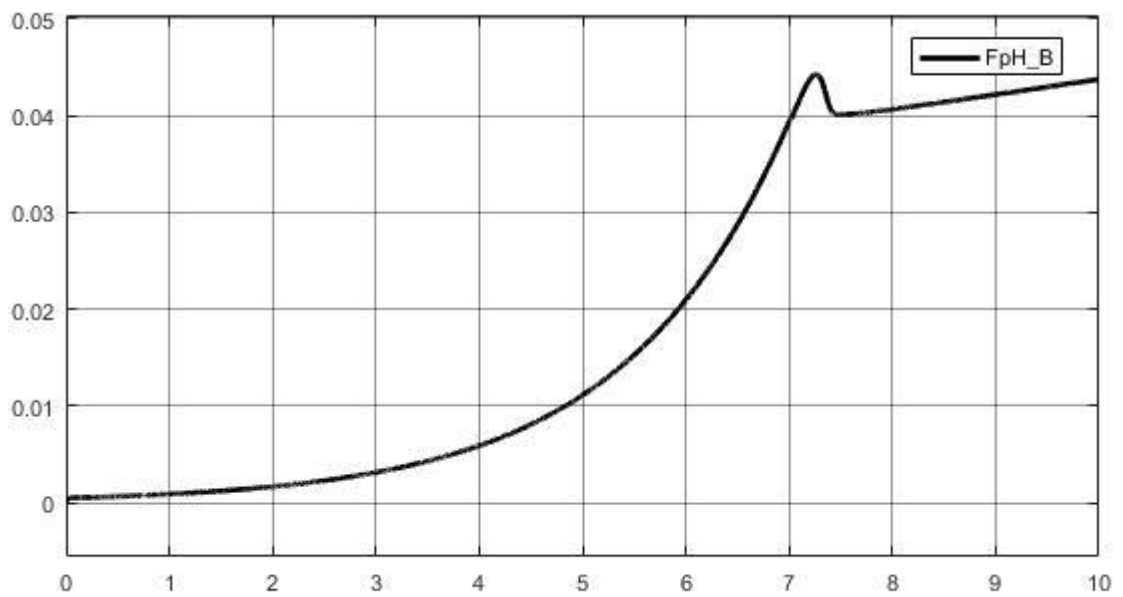
Patikslinus PI reguliatoriaus parametrus:

$$K_r = -3.845 \cdot 10^6; T_i = 2.505 \cdot 10^{-2}$$

Čia yra sumažinamas PI reguliatoriaus K_r koeficientas, kad esant žymesniems nuostato svyravimams, reguliavimo sistema būtų mažiau jautri ir nesigautų pernelyg stiprių pH lygio svyravimų.



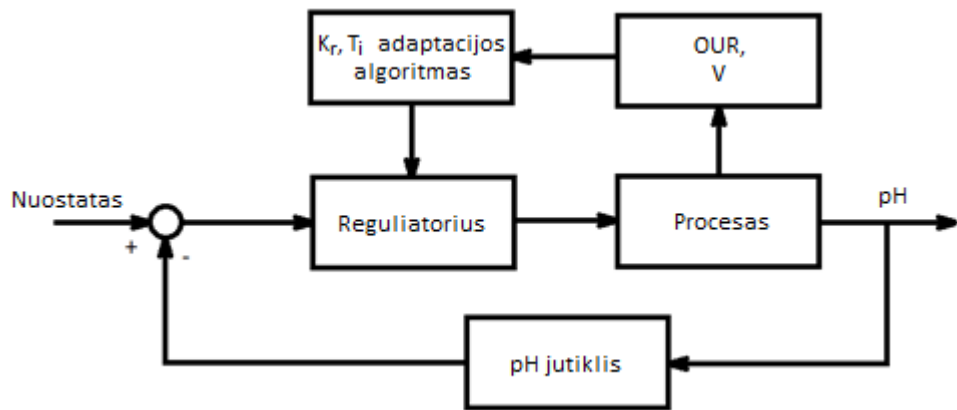
28 pav. pH lygio palaikymas pritaikius klasikinį PI reguliatorių



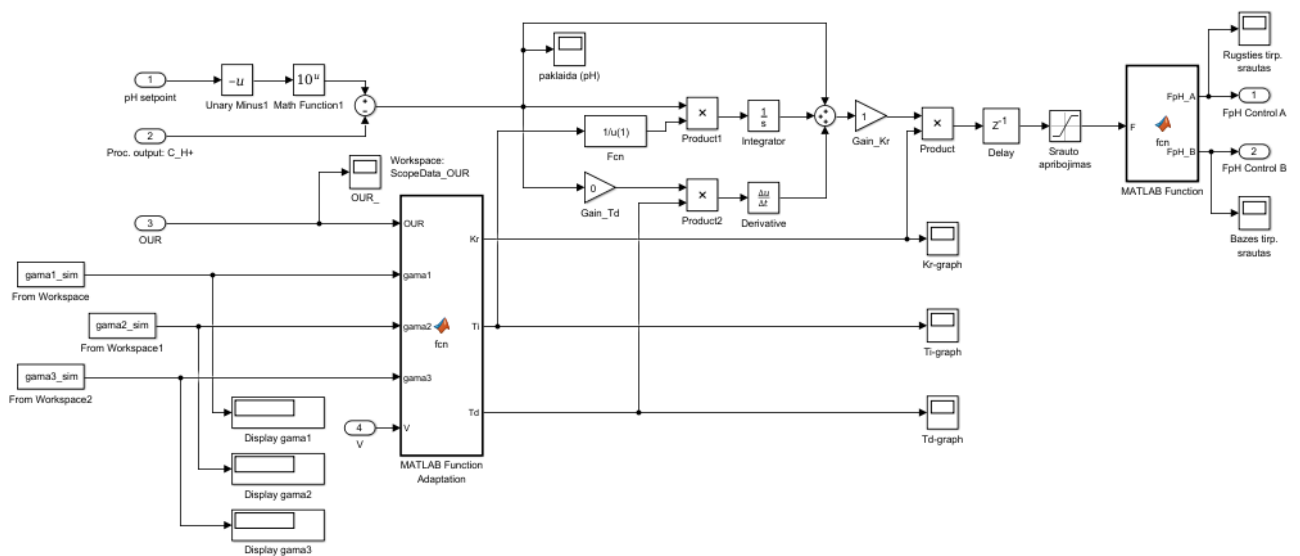
29 pav. Bazės tirpalo srautas F_{pH} , pritaikius klasikinį PI reguliatorių

2.2.5 Valdymo blokų sudarymas. Adaptyvusis PI reguliatorius

Adaptyviojo reguliatoriaus modelis (31 pav.) sudaromas pagal 30 pav. pateiktą struktūrą.



30 pav. Adaptyvios pH valdymo sistemos struktūra



31 pav. Adaptyviojo pH regulatoriaus blokas

Adaptyviajam reguliatoriui panaudojami jau apskaičiuoti klasikinio PI reguliatoriaus parametrai. Čia dar papildomai yra pritaikomas adaptyvusis reguliatoriaus blokas, kuris panaudojant apskaičiuotą deguonies suvartojimo kiekį procese (OUR) ir proceso kultivavimo terpės tūrio matavimo duomenis (V) pagal stiprinimo numatymą pritaiko reguliatoriaus parametrus K_r ir T_i pagal (12) ir (13) lygtis [3], [10]:

$$K_r = K_{r0} \cdot \gamma_3 \cdot V \quad (12)$$

Čia K_{r0} – klasikinio PI reguliatoriaus nustatytas stiprinimo koeficientas ($K_r = -3.845 \cdot 10^6$)
 γ_3 – identifikuojamasis adaptyviojo PI reguliatoriaus K_r dedamosios adaptacijos parametras;
 V – kultivavimo terpės tūris.

$$T_i = \frac{\gamma_1}{\gamma_2 + OUR} \quad (13)$$

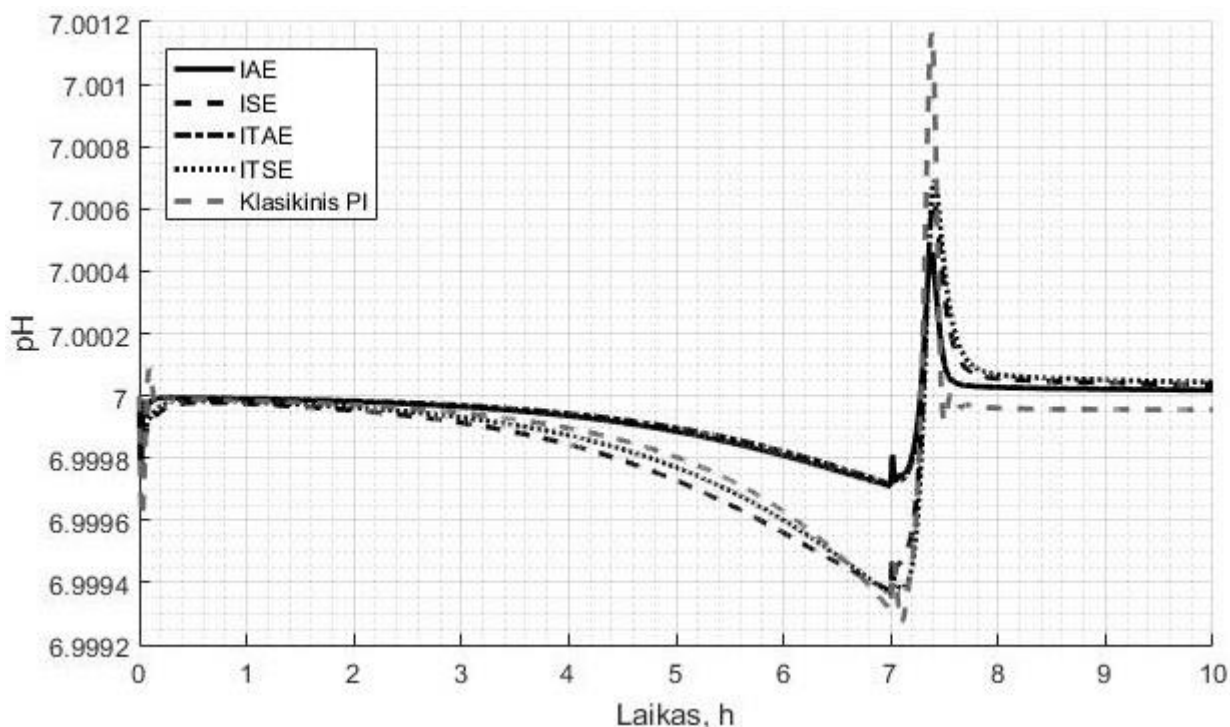
Čia γ_1, γ_2 – identifikuojamieji adaptyviojo PI reguliatoriaus T_i dedamosios adaptacijos parametrai;
 OUR – deguonies suvartojimo sparta.

2.3 Adaptacijos parametru optimizavimas

Adaptacijos parametrams optimizuoti buvo panaudoti integraliniai kriterijai:

- IAE (angl. *Integral of the Absolute Value of the Error*),
- ISE (angl. *Integral of the Square of the Error*),
- ITAE (angl. *Integral of the Time-Weighted Absolute Value of the Error*),
- ITSE (angl. *Integral of the Time-Weighted Square of the Error*).

Optimizuojant buvo keičiamas nuostatas vienos valandos trukmės intervalais viso modeliavimo metu, o pH lygis buvo keičiamas 6,995–7,005 ribose.

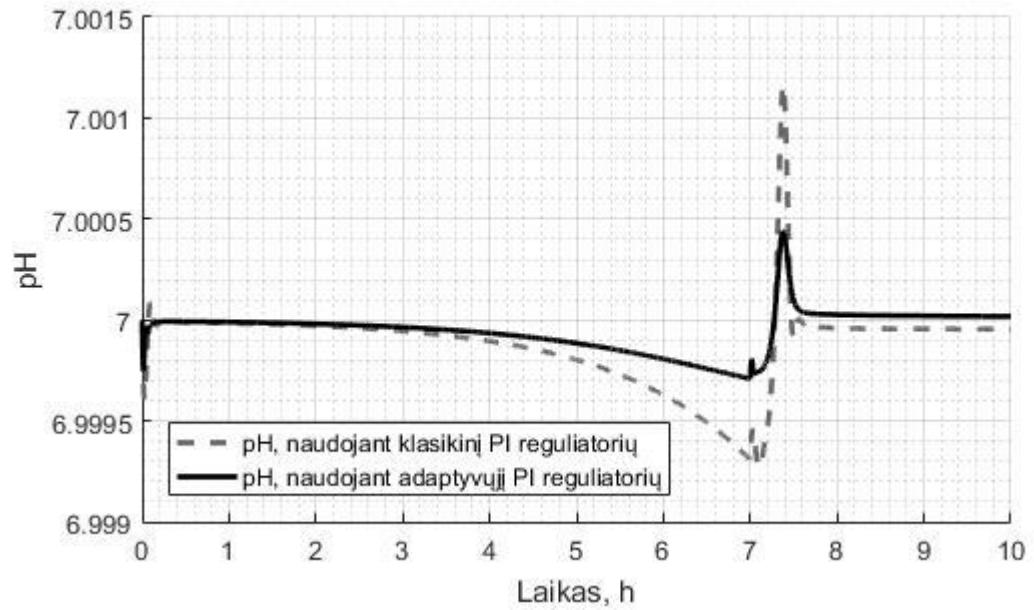


32 pav. pH lygio palaikymas naudojant klasikinį PI ir adaptyvųjų PI reguliatorių, kai adaptacijos parametru optimizavimui taikomi skirtingi integraliniai kriterijai

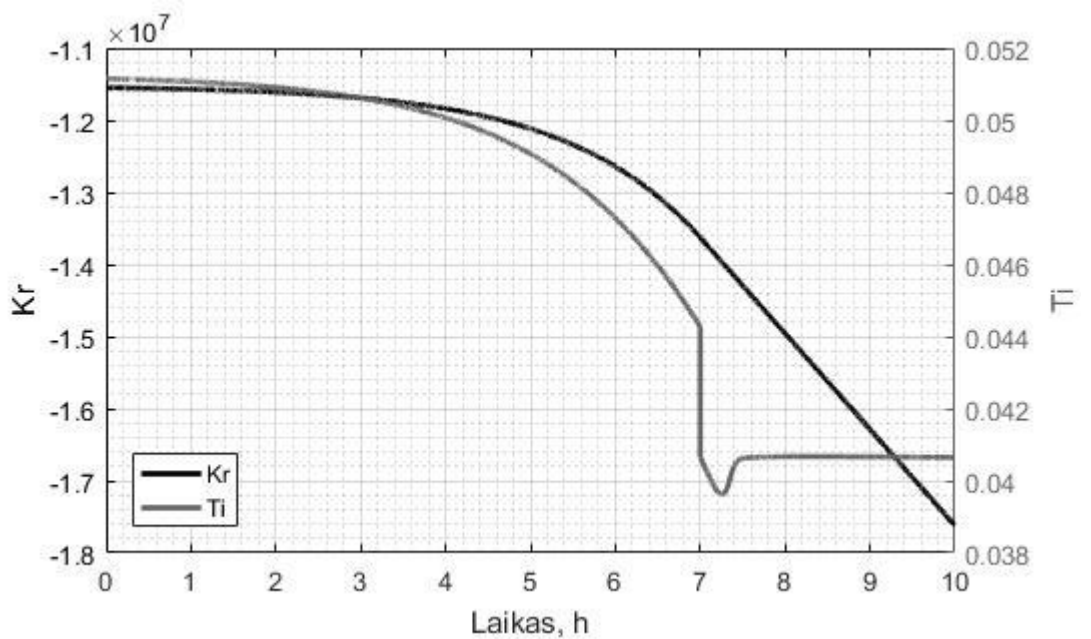
32 pav. matosi, kad didžiausi nuokrypiai nuo nuostato gaunami, yra naudojant adaptacijos parametrus, gautus optimizavimo algoritme naudojant ISE ir ITSE kriterijus. Mažiausias nuokrypis yra naudojant IAE ir ITAE kriterijus. Taip pat matosi, kad perėjus į antrąją proceso fazę (kai modeliavimo laikas viršija 7 val.), didesnis perreguliuavimas yra gaunamas naudojant ITAE kriterijų, todėl šis yra atmetamas ir lieka tik IAE kriterijus kuris duoda mažiausius nuokrypius nuo nuostato.

9 lentelė. pH lygio nuokrypiai naudojant klasikinį PI ir adaptyvųjų PI reguliatorių.

Regulatoriaus tipas	Maks. nuokrypis nuo nuostato į neigiamą pusę	Maks. nuokrypis nuo nuostato į teigiamą pusę
Klasikinis PI	$-7.5 \cdot 10^{-4}$	$11.5 \cdot 10^{-4}$
Adaptyvusis PI, IAE	$-2.9 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
Adaptyvusis PI, ISE	$-6.2 \cdot 10^{-4}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$
Adaptyvusis PI, ITAE	$-2.8 \cdot 10^{-4}$	$6.25 \cdot 10^{-4}$
Adaptyvusis PI, ITSE	$-6.3 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$



33 pav. pH lygio palaikymo palyginimas naudojant klasikinį PI ir adaptyvųjį PI reguliatorių



34 pav. Koeficientų K_r ir T_i kitimas, naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių

“Matlab Function – Adaptation” bloko sudarytas kodas:

```
function [Kr, Ti, Td] = fcn(OUR, gama1, gama2, gama3, V)

Kr = -3.845*10^6 * gama3 * V;

Ti = gama1 / (gama2 + OUR);

Td = 1; % (Td Gain = 0).
```

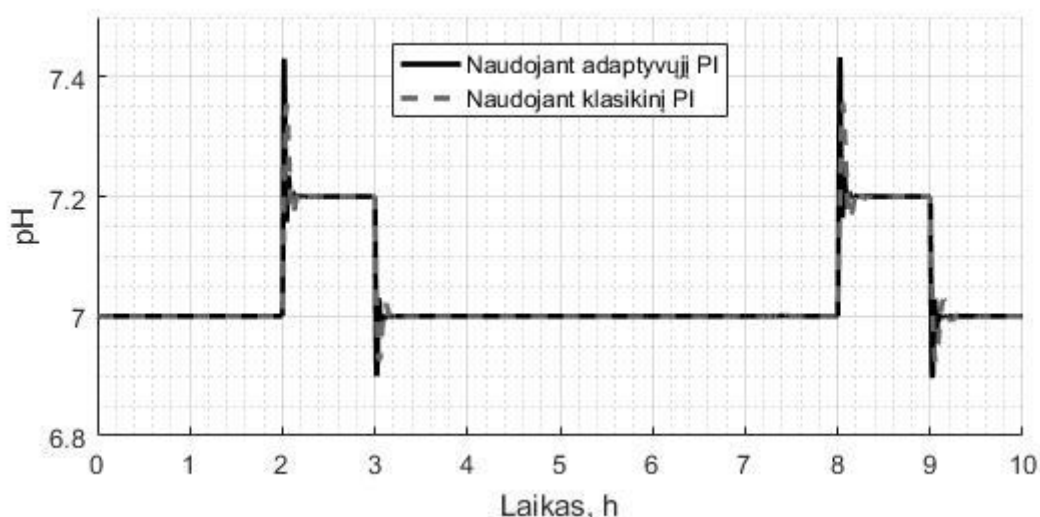
3. Reguliavimo sistemų tyrimas

Sudarytų reguliavimo sistemų tyrimui atlikti yra atliekami tokie bandymai:

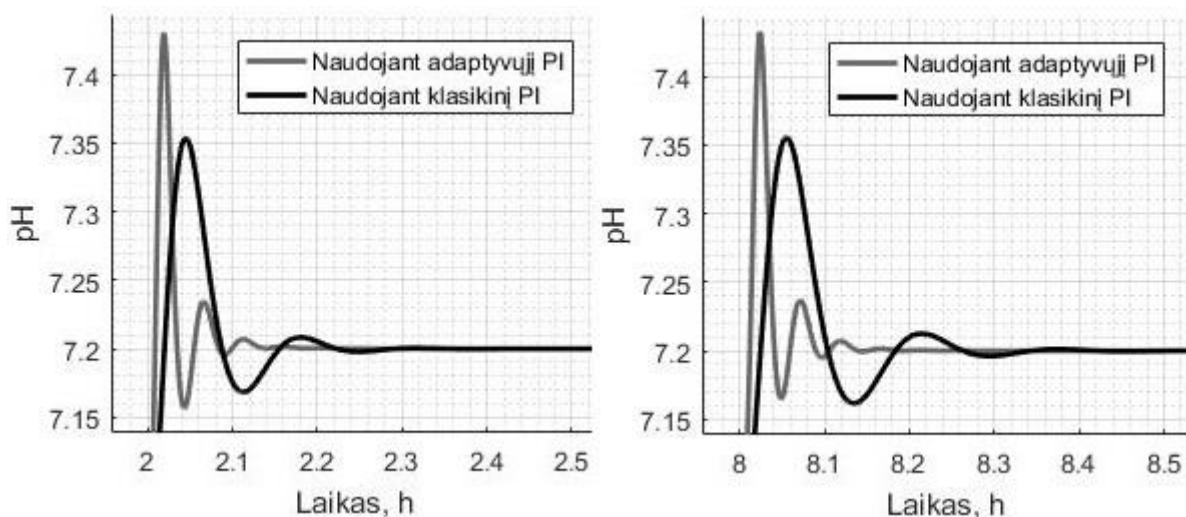
- Reguliavimo sistemų reakcijos palyginimas esant impulsiniam nuostato pakeitimui pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje;
- Reguliavimo sistemų palyginimas esant šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimui pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje;
- Reguliavimo sistemų palyginimas esant substrato tirpalo siurblio našumo sumažėjimui pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje;
- Adaptyviojo PI reguliatoriaus reguliavimo kokybės tyrimas esant tūrio matavimo jutiklio trikdžiui;
- Reguliavimo sistemų reakcijos palyginimas esant pH jutiklio trikdžiams

3.1 Reguliavimo sistemų reakcija į nuostato pakeitimą

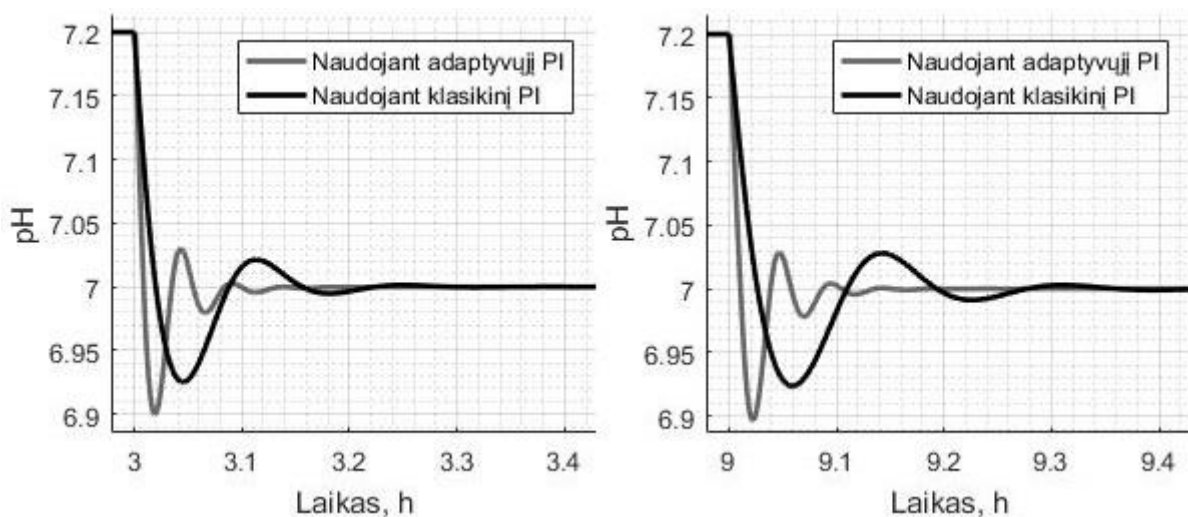
Čia yra naudojamas impulsinis nuostato pokytis: kai modeliavimo laikas lygus 2 val., nuostatas yra padidinamas iki $\text{pH}=7.2$, kai modeliavimo laikas lygus 3 val., nuostatas yra grąžinamas atgal į $\text{pH}=7$. Tokios pačios trukmės ir amplitudės impulsas naudojamas antrojoje proceso fazėje, modeliavimo laikui pasiekus 8 val. (35 pav.)



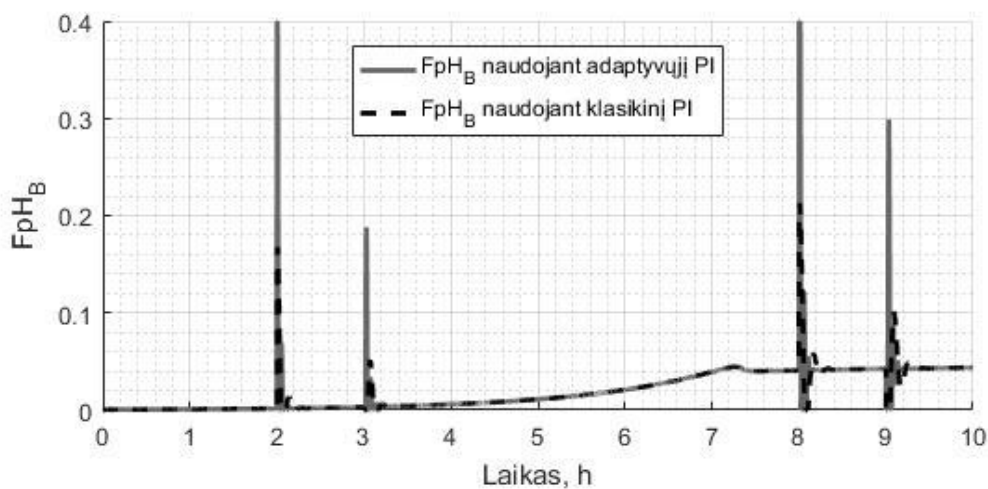
35 pav. Proceso reakcijos į nuostato pokytį palyginimas naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių



36 pav. Proceso reakcijos į nuostato pokytį palyginimas naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių, kai pH nuostatas keičiamas iš 7,0 į 7,2



37 pav. Proceso reakcijos į nuostato pokytį palyginimas naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių, kai pH nuostatas keičiamas iš 7,2 į 7,0



38 pav. Šarmo tirpalo srauto palyginimas esant nuostato pokyčiui, kuomet yra naudojamas klasikinis ir adaptyvusis PI reguliatorius

10 lentelėje pateikiami duomenys iš 36 pav. ir 37 pav., kai nuostatas kinta iš 7,0 į 7,2 ir atvirkščiai, pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje.

10 lentelė. Proceso pH reguliavimo kokybės keičiant pH nuostatą rezultatai, kai naudojamas klasikinis PI ir adaptyvusis PI reguliatorius.

Nuostatas	Proceso fazė	Regulatoriaus tipas	Maksimalus nuokrypis	Svyravimų slopimo santykis	Minimali pakilimo trukmė (h)	Reguliavimo trukmė (h)
7,2	1	Klasikinis PI	0,152	0,066	0,045	0,18
		Adaptyvusis PI	0,23	0,152	0,02	0,11
	2	Klasikinis PI	0,155	0,077	0,055	0,24
		Adaptyvusis PI	0,23	0,152	0,021	0,11
7,0	1	Klasikinis PI	-0,075	0,133	0,045	0,14
		Adaptyvusis PI	-0,1	0,200	0,02	0,09
	2	Klasikinis PI	-0,075	0,133	0,06	0,18
		Adaptyvusis PI	-0,1	0,200	0,021	0,09

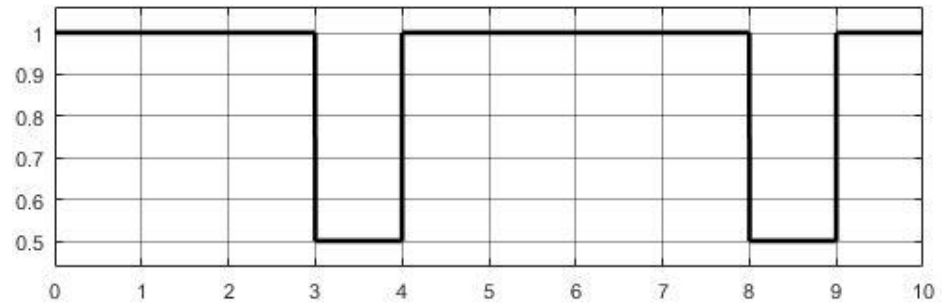
Palyginus šio tyrimo rezultatus (11 lentelė) matosi, kad esant nuostato pokyčiui adaptyvusis PI reguliatorius sudaro didesnius proceso pH lygio svyravimus kurių maksimalių nuokrypių vidurkis siekia 0,165 pH vnt., tačiau pasiekia nuostatą vidutiniškai per 0,1 val. Klasikinio regulatoriaus maksimalių nuokrypių vidurkis siekia 0,114 pH vienetus, bet reguliavimo trukmė, lyginant su adaptyviuoju pH reguliatoriumi, išauga iki 0,185 val. Taip pat pastebima, jog antrojoje proceso fazėje naudojant klasikinį PI reguliatorių išauga reguliavimo trukmė (nuo 0,18 val. iki 0,24 val. kai pH nuostatas pakeičiamas iš 7 į 7,2; ir nuo 0,14 val. iki 0,18 val. kai pH nuostatas gražinamas iš 7,2 į 7), kai tuo tarpu adaptyviojo pH regulatoriaus reguliavimo laikas pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje nekinta.

11 lentelė. Tyrimo, kai yra keičiamas pH nuostatas, rezultatų palyginimas.

Regulatoriaus tipas	Maksimalių nuokrypių vidurkis, pH	Nuokrypio palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %	Reguliavimo trukmės vidurkis (val.)	Reguliavimo trukmės palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %
Klasikinis PI	0,114	44,74	0,185	-45,95
Adaptyvusis PI	0,165		0,1	

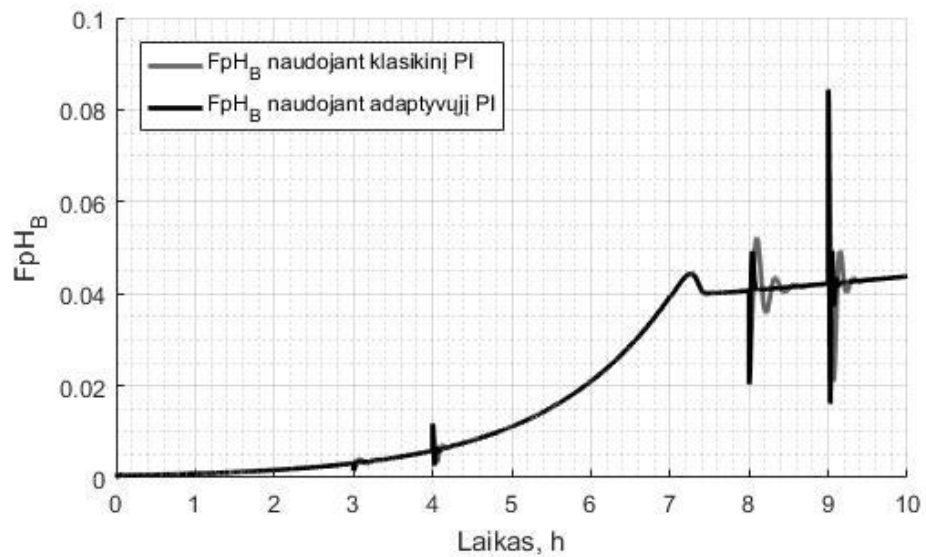
3.2 Reguliavimo sistemų reakcija į šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimą

Atliekant šį bandymą yra sumažinamas šarmo tirpalo siurblio našumas nuo 100% iki 50%, kai modeliavimo laikas lygus 3 val. Po valandos šio siurblio našumas yra gražinamas atgal į 100%. Toks pat našumo sumažinimas vykdomas antrojoje proceso fazėje, kai modeliavimo laikas pasiekia 8 val. Šarmo tirpalo siurblio našumo pakeitimai modeliavimo metu pavaizduoti 39 pav.

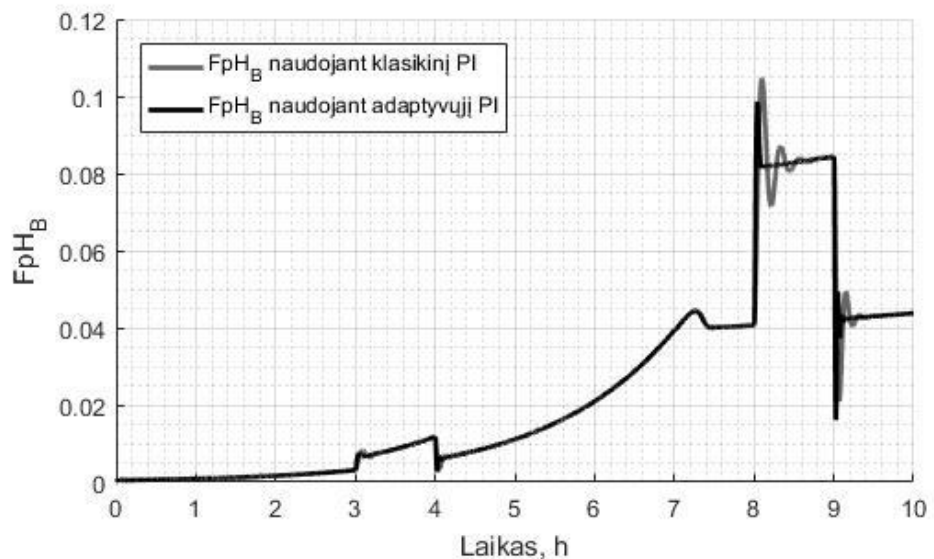


39 pav. FpH tirpalo siurblio našumo sumažinimas

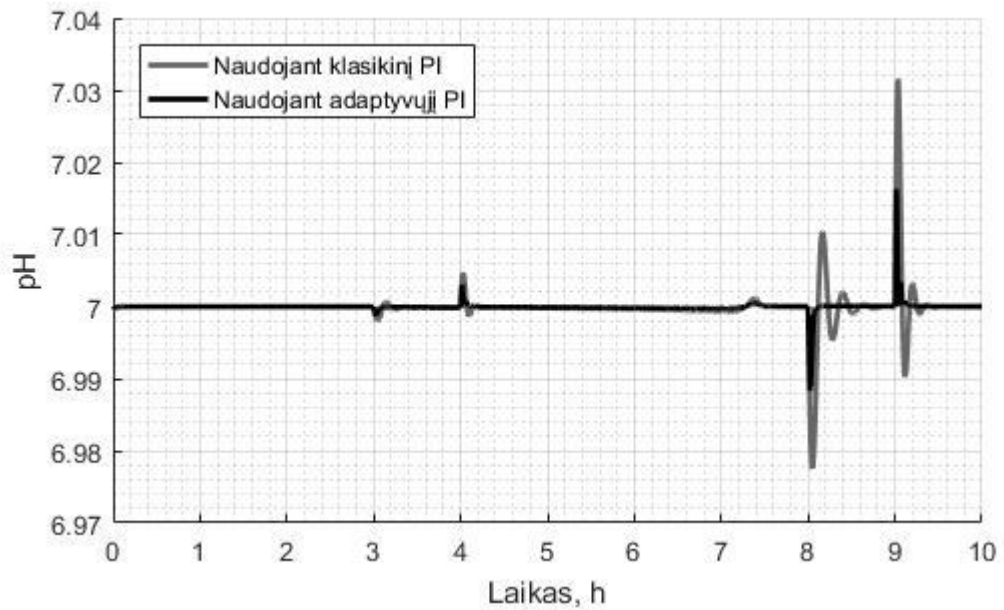
Esant tokiems siurblio našumo sumažėjimams yra palaikomas pastovus šarmo tirpalo srautas (40 pav.) didinant signalo amplitudę iš reguliatorių (41 pav.). palaikant pastovų tirpalo srautą yra palaikomas pastovus pH lygis (42 pav.) su nežymiais svyravimais keičiantis siurblio našumui.



40 pav. Šarmo tirpalo srauto palaikymas esant šio tirpalo siurblio našumo sumažėjimui, naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių



41 pav. Šarmo tirpalo srauto palaikymui formuojamas signalas esant šio tirpalo siurblio našumo sumažėjimui, naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių



42 pav. pH lygio palaikymo palyginimas esant šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimui, naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių

12 lentelėje pateikiami 42 pav. pavaizduoto pH lygio svyravimų duomenys.

12 lentelė. Šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimo tyrimo rezultatai, kai naudojamas klasikinis PI ir adaptyvusis PI reguliatorius.

Siurblio našumas	Proceso fazė	Regulatoriaus tipas	Maksimalus nuokrypis	Svyravimų slopimo santykis	Reguliavimo trukmė (h)
50%	1	Klasikinis PI	-0,002	0,250	0
		Adaptyvusis PI	-0,001	0,000	0
	2	Klasikinis PI	-0,022	0,227	0,05
		Adaptyvusis PI	-0,011	0,000	0,1
100%	1	Klasikinis PI	0,0046	0,043	0,4
		Adaptyvusis PI	0,0028	0,214	0,07
	2	Klasikinis PI	0,031	0,097	0,27
		Adaptyvusis PI	0,016	0,188	0,1

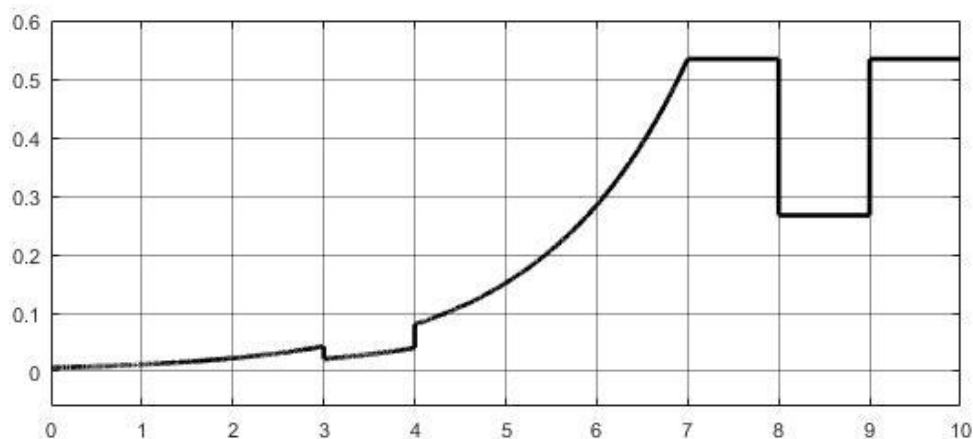
Naudojant klaiskinį PI reguliatorių, šio bandymo metu gaunamas maksimalių nuokrypių vidurkis lygus 0,0298, o vidutinė reguliavimo trukmė lygi 0,18 val. Kai reguliavimo sistemoje naudojamas adaptyvusis PI reguliatorius, šio bandymo maksimalių nuokrypių vidurkis lygus 0,0077, o vidutinė reguliavimo trukmė lygi 0,068. Iš to matosi, kad šiame bandyme visais atvejais adaptyviojo pH regulatoriaus didžiausias nuokrypis yra mažesnis nei naudojant klasikinį PI reguliatorių. Taip pat naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių yra mažesnė reguliavimo trukmė, negu naudojant klasikinį PI reguliatorių (13 lentelė). Iš to išeina, kad naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių proceso pH lygis yra mažiau paveikiamas šarmo siurblio keliamais trikdžiais, nei naudojant klasikinį PI reguliatorių.

13 lentelė. Šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimo tyrimo rezultatų palyginimas.

Regulatoriaus tipas	Maksimalių nuokrypių vidurkis, pH	Nuokrypio palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %	Reguliavimo trukmės vidurkis (val.)	Reguliavimo trukmės palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %
Klasikinis PI	0,0298	-76,51	0,18	-62,22
Adaptyvusis PI	0,007		0,068	

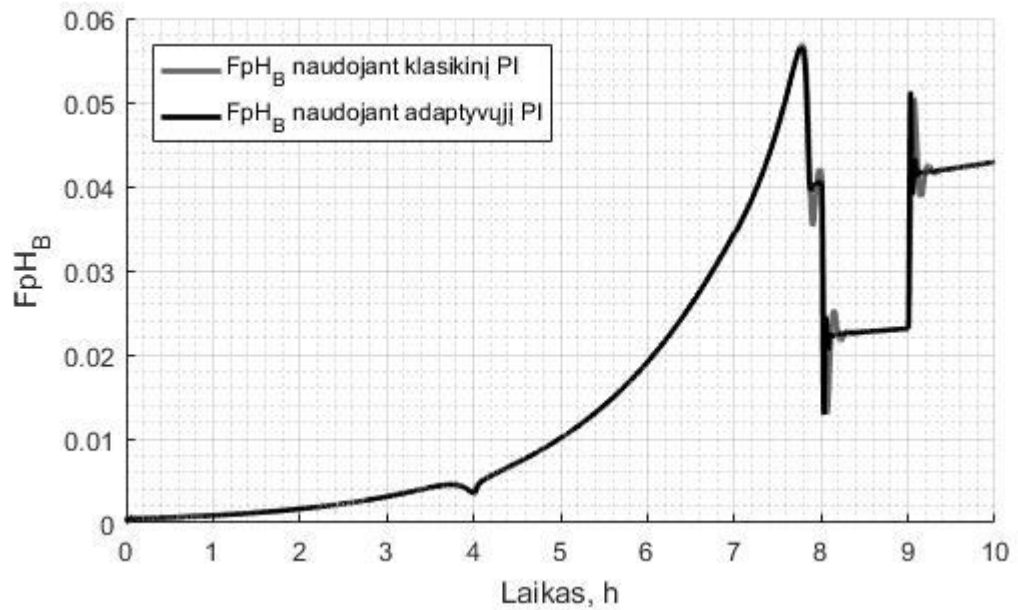
3.3 Reguliavimo sistemų reakcija į substrato pamaitinimo siurblio našumo sumažėjimą

Atliekant šį bandymą trikdžių laikai, trukmės ir amplitudės taikomos tokios pat kaip ir reguliavimo sistemų reakcijos į šarmo tirpalo siurblio našumo sumažėjimo bandyme (39 pav.). Kadangi substrato tirpalo srautas yra formuojamas pagal numatytą algoritmą, šio tirpalo siurblio sukelti trikdžiai nėra kompensuojami (43 pav.)



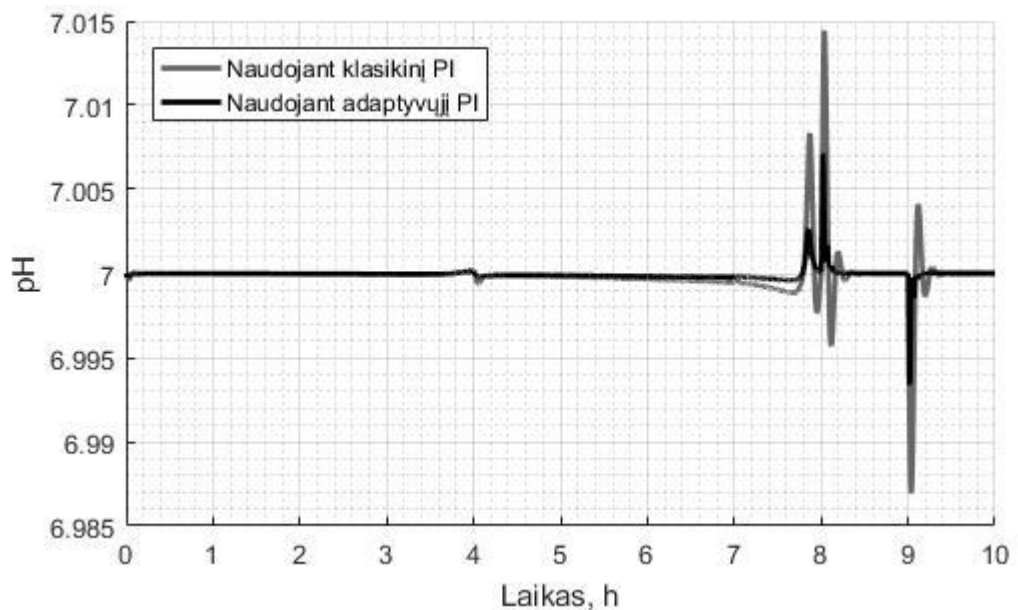
43 pav. Šarmo tirpalo siurblio našumo sumažinimo įtaka substrato tirpalo srautui

Toks substrato tirpalo srauto pokytis mažina bazės tirpalo srauto poreikį dėl savo pH kuris lygus 7 vnt. ir palyginti didesnio srauto, nei šarmo tirpalo (44 pav.).



44 pav. Bazės tirpalo srautas esant substrato tirpalo siurblio našumo sumažėjimui, naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių

Tokie substrato srauto pokyčiai atitinkamai iššaukia ir pH svyravimus (45 pav.).



45 pav. pH lygio palaikymo palyginimas esant substrato tirpalo siurblio našumo sumažėjimui, naudojant klasikinį ir adaptyvųjį PI reguliatorių

14 lentelėje pateikiami duomenys iš 45 pav. Čia matosi, kad pirmojoje proceso fazėje, kuomet šarmo tirpalo poreikis yra nežymus ir substrato tirpalo poreikis siekia vos 0,042–0,082 L/h, substrato siurblio sukelti trikdžiai pH reguliavimo procesą paveikia minimaliai. Tačiau taikant tokį patį trikdį antrojoje proceso fazėje, kuomet substrato tirpalo poreikis yra maksimalus (0,534 L/h) ir bazės tirpalo poreikis yra išaugęs, tada gaunami žymiai didesni pH svyravimai sumažėjant substrato siurblio našumui iki 50%, kai modeliavimo laikas lygus 8 val., ir padidėjus substrato siurblio našumui atgal iki 100%, kai modeliavimo laikas lygus 9 val.

14 lentelė. pH lygio svyravimai sumažėjus substrato tirpalo siurblio našumui naudojant klasikinį PI ir adaptyvųjį PI reguliatorių.

Trikdžio pradžios laikas	Regulatoriaus tipas	Maksimalus nuokrypis	Svyravimų slopimo santykis	Reguliavimo trukmė (h)
8	Klasikinis PI	0,014	0,071	0,2
	Adaptyvusis PI	0,007	0,214	0,1
9	Klasikinis PI	-0,013	0,077	0,22
	Adaptyvusis PI	-0,006	0,167	0,08

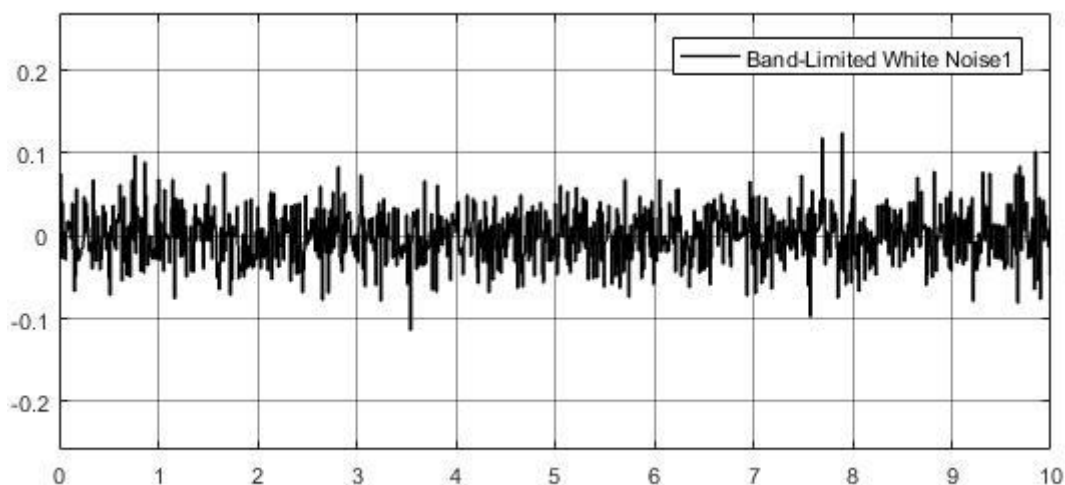
Iš šių rezultatų matyti, kad naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių yra gaunami maksimalūs nuokrypiai, kurių vidurkis lygus 0,0065, o reguliavimo laiko vidurkis lygus 0,09 val. Taikant klasikinį PI reguliatorių šio bandymo maksimalių nuokrypių vidurkis siekia 0,0135, o reguliavimo laiko vidurkis siekia 0,21 val. (15 lentelė).

15 lentelė. Substrato tirpalo siurblio našumo sumažėjimo tyrimo rezultatų palyginimas.

Regulatoriaus tipas	Maksimalių nuokrypių vidurkis, pH	Nuokrypio palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %	Reguliavimo trukmės vidurkis (val.)	Reguliavimo trukmės palyginimas (kai naudojamas adaptyvusis PI), %
Klasikinis PI	0,0135	-51,85	0,21	-57,14
Adaptyvusis PI	0,0065		0,09	

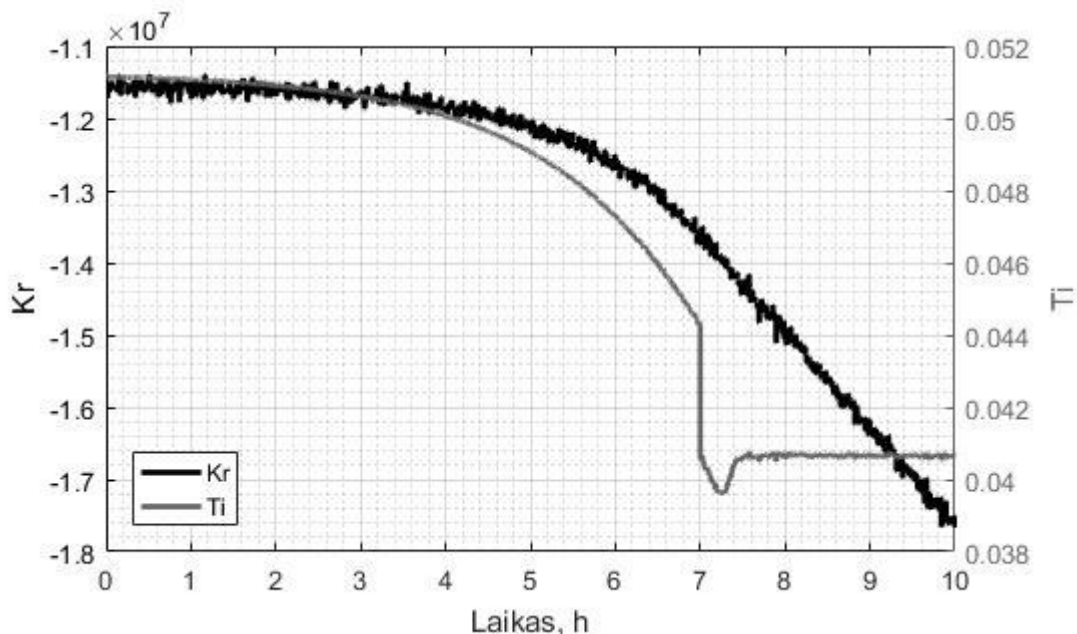
3.4 Adaptyviojo PI regulatoriaus reguliavimo kokybės tyrimas esant tūrio matavimo jutiklio trikdžiui

Atliekant šį bandymą sudarytame modelyje kaip trikdis yra panaudojamas balto triukšmo signalas (46 pav.), kuris yra paduodamas į tūrio jutiklio signalo grandinę.



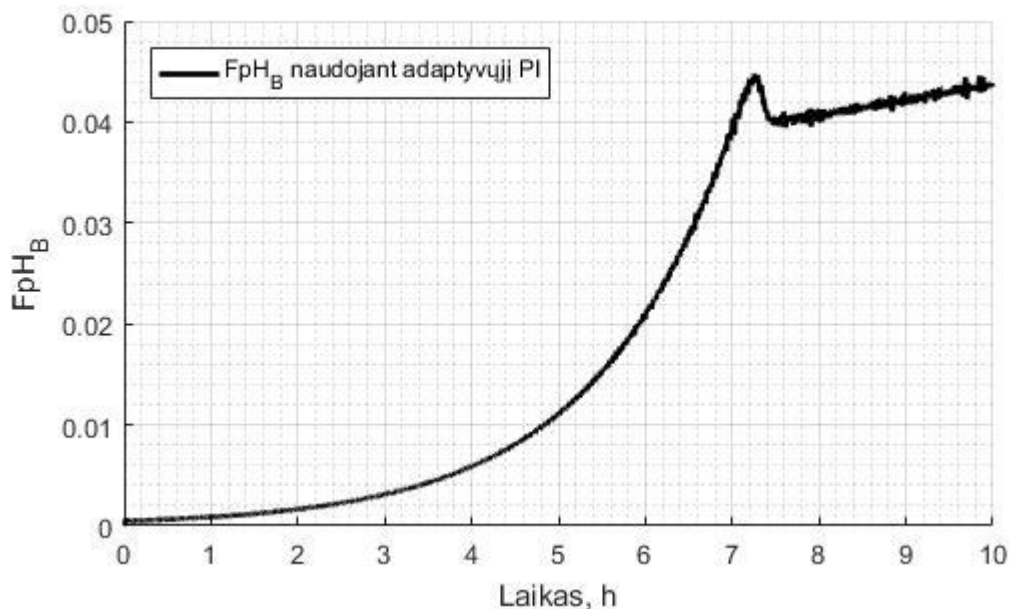
46 pav. Triukšmas veikiantis tūrio jutiklio signalą

Toliau naudojant tūrio jutiklio duomenis apskaičiuojama deguonies suvartojimo sparta ir adaptyvusis PI reguliatorius pagal šiuos skaičiavimus, tūrio jutiklio duomenis ir adaptacijos algoritmus modeliavimo metu formuoja K_r ir T_i dedamasias (47 pav.). Kadangi parametras K_r tiesiogiai priklauso nuo tūrio (12), todėl jis yra paveikiamas stipriau, negu T_i parametras. Taip išauga adaptuojamųjų parametru paklaidos.

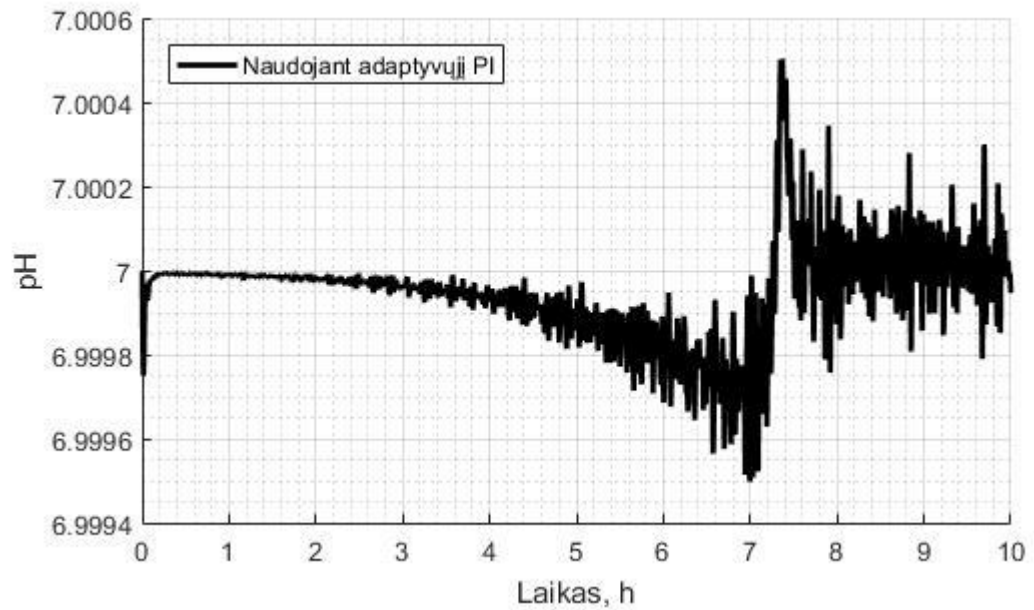


47 pav. Adaptyviojo PI reguliatoriaus K_r ir T_i vertės veikiant tūrio matavimo trikdžiui

Pagal proceso grįžtamąjį pH jutiklio signalą ir naudojant formuojamas K_r ir T_i dedamasias toliau yra dozuojamas bazės tirpalas (48 pav.), o šis iššaukia proceso terpės pH svyravimus (49 pav.).



48 pav. Bazės tirpalo srautas veikiant tūrio matavimo trikdžiui

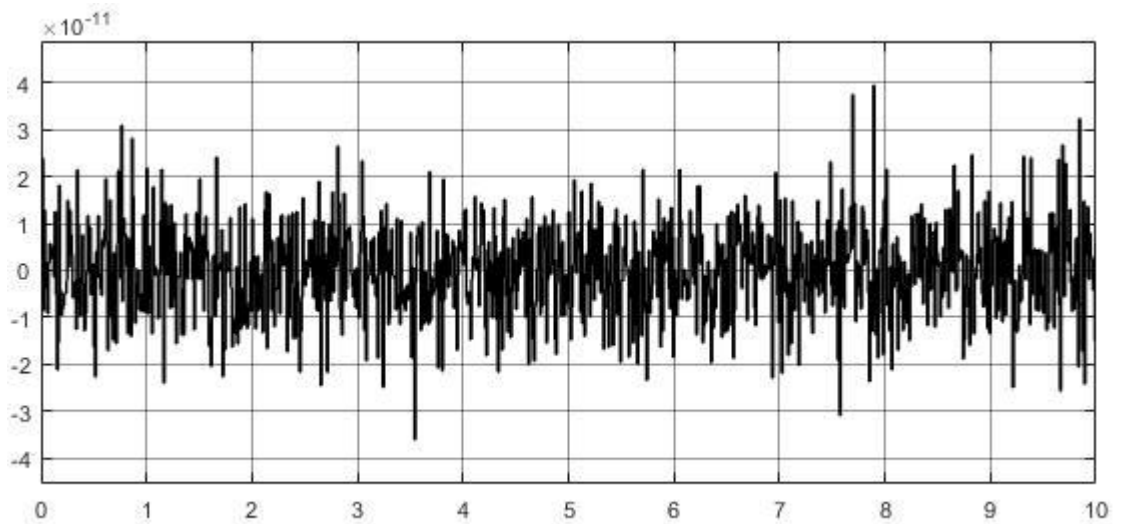


49 pav. pH lygio palaikymas naudojant adaptyvųjį PI reguliatorių

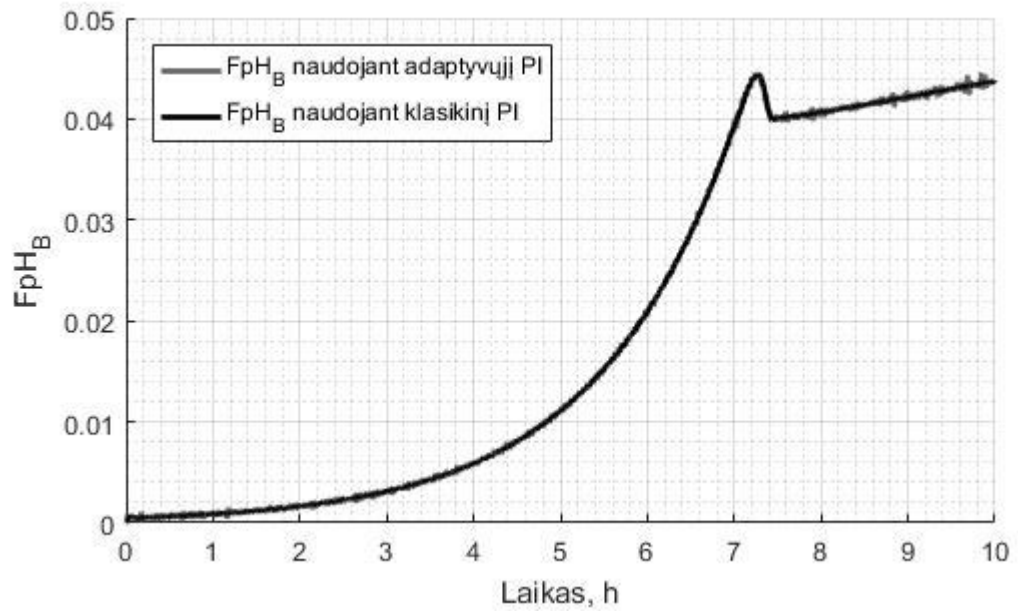
Iš to matyti, kad didėjant K_r ir T_i , laikui bėgant stiprėja tūrio jutiklio signalo triukšmo sukeltami proceso pH svyravimai, kurių vidutinė amplitudė išauga apytiksliai nuo 0 iki 0.00015 pH vnt.

3.5 Reguliavimo sistemų reakcija esant pH jutiklio trikdžiams

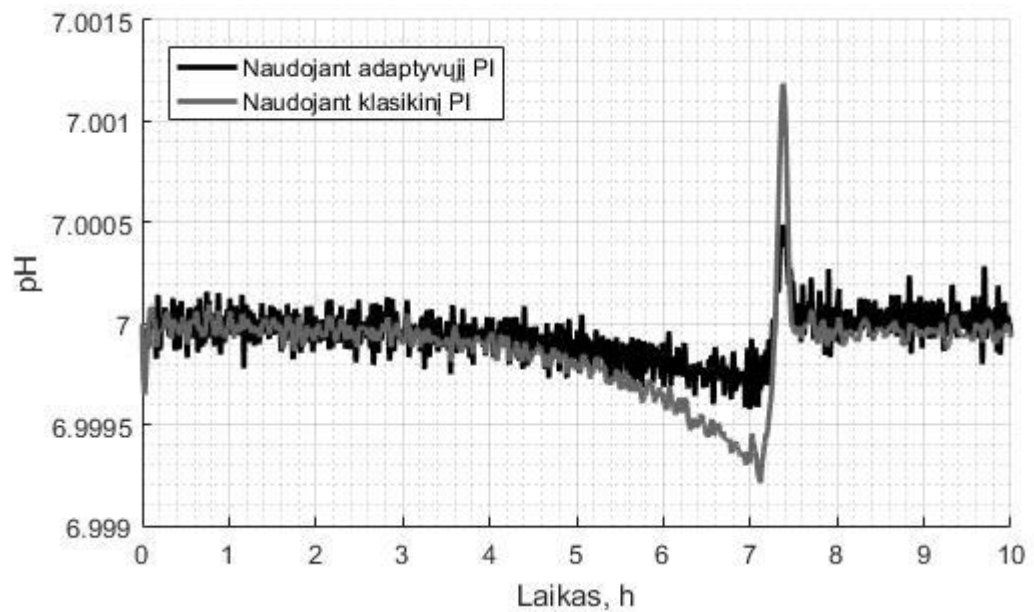
Čia sudarytame modelyje kaip trikdys yra panaudojamas balto triukšmo signalas (50 pav.), kuris yra paduodamas į pH jutiklio grįžtamojo ryšio grandinę. Šis triukšmas paveikia reguliatoriaus paklaidos tikslumą, todėl tai iššaukia bazės tirpalo srauto svyravimus (51 pav.), dėl ko atsiranda pH lygio svyravimai (52 pav.).



50 pav. Triukšmas veikiantis pH jutiklio grįžtamojo ryšio signalą



51 pav. Bazės tirpalo srautų palyginimas veikiant tūrio matavimo trikdžiai



52 pav. pH lygio palaikymo palyginimas naudojant klasikinį ir adaptyviųjį PI reguliatorių

Iš šio bandymo rezultatų matosi, kad valdant procesą adaptyviuoju PI reguliatoriumi kuomet pH jutiklis yra paveikiamas baltojo triukšmo trikdžiu, jo svyravimai išauga apytiksliai 2 kartus, lyginant su klasikiniu PI reguliatoriumi.

Išvados

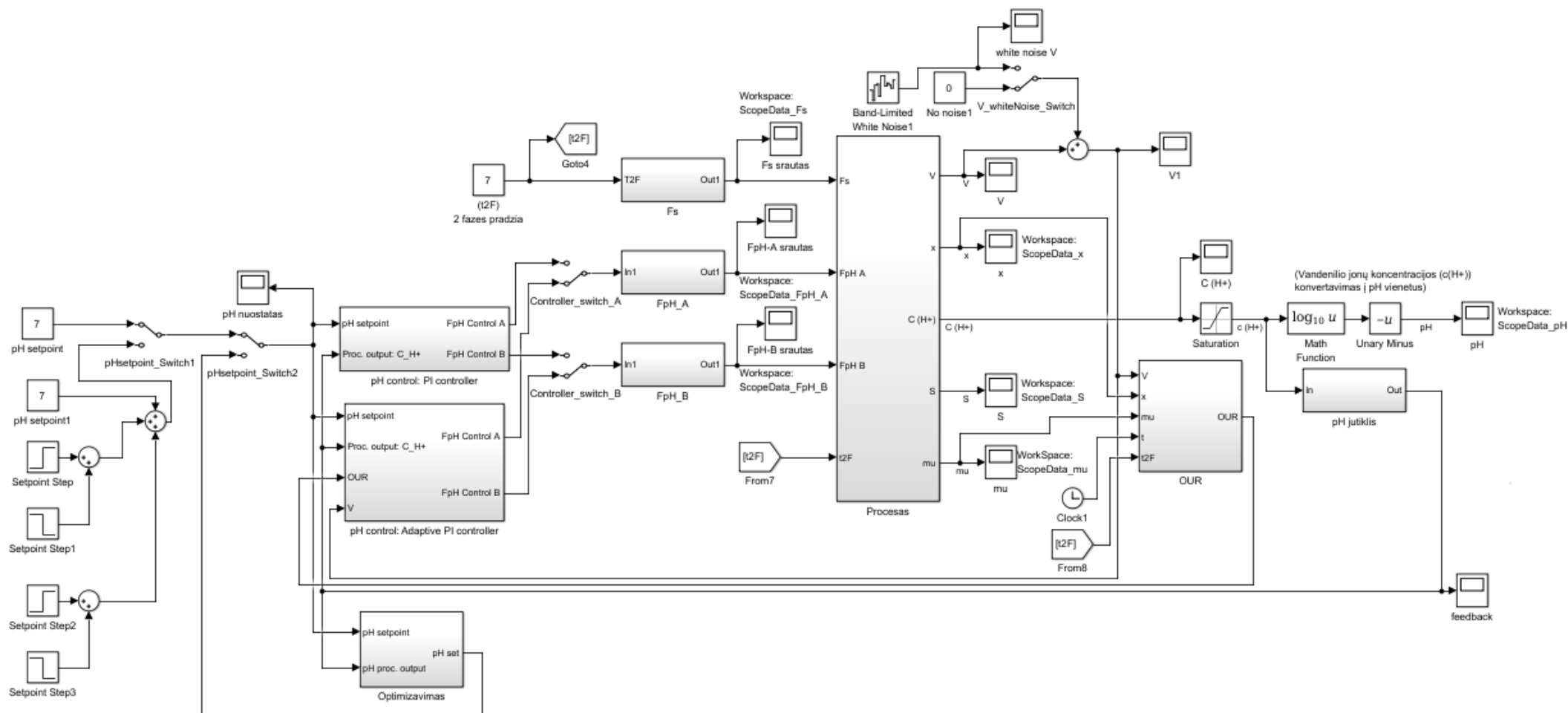
1. Vykdamt adaptvijo regulatoriaus adaptacijos parametru optimizavima, didžiausias regulavimo kokybes pagerėjimas buvo pasiektas naudojant integralinį absoliutinės paklaidos (IAE) regulavimo kokybes kriterijų.
2. Esant nuostato pokyčiui, kuomet yra naudojamas adaptvusias PI reguliatorius, yra gaunami 44,74% didesni pH svyravimai ir 45,95% mažesnė regulavimo trukmė, lyginant su klasikiniu PI reguliatoriumi.
3. Nuostato pokyčio tyrimo metu pastebima, jog antrojoje proceso fazėje naudojant klasikinį PI reguliatorių išauga regulavimo trukmė (nuo 0,18 val. iki 0,24 val. kai pH nuostatas pakeičiamas iš 7 į 7,2; ir nuo 0,14 val. iki 0,18 val. kai pH nuostatas grąžinamas iš 7,2 į 7), kai tuo tarpu adaptvijo pH regulatoriaus regulavimo laikas pirmojoje ir antrojoje proceso fazėje nekinta.
4. Šarmo tirpalo siurblio našumo sumažinimo bandymo metu nustatyta, kad taikant adaptvųjų PI reguliatorių yra gaunami 76,51% mažesni pH nuokrypiai nuo nuostato ir 62,22% mažesnė regulavimo trukmė lyginant su klasikiniu PI reguliatoriumi.
5. Substrato tirpalo siurblio našumo sumažinimo bandymo metu nustatyta, kad taikant adaptvųjų PI reguliatorių yra gaunami 51,85% mažesni pH svyravimai nuo nustatytos vertės ir 57,14% mažesnė regulavimo trukmė, negu taikant klasikinį PI reguliatorių.
6. Iš tūrio matavimo signalo trikdžių bandymo rezultatų matyti, kad didėjant K_r ir T_i , laikui bėgant stiprėja tūrio jutiklio signalo triukšmo sukeliama proceso pH svyravimai, kurių vidutinė amplitudė modeliavimo metu išauga apytiksliai nuo 0 iki 0,00015 pH vnt.
7. Atliekant baltojo triukšmo pH jutiklio grįžtamojo ryšio grandinėje bandymą pastebėta, kad naudojant adaptvųjų PI reguliatorių pH svyravimai išauga apytiksliai 2 kartus, lyginant atvejį, kai pH regulavimui naudojamas klasikinis PI reguliatorius.
8. Sudarytas adaptvusias PI reguliatorius, lyginant su klasikiniu PI reguliatoriumi, išlaiko geresnę regulavimo kokybę esant tirpalų tiekimo siurblių trikdžiams, tačiau nepralenkia klasikinio PI regulatoriaus regulavimo kokybės esant pH jutiklio trikdžiams.
9. Taikant adaptvųjų PI reguliatorių, kai procesas yra veikiamas nuostato pokyčio ir tirpalų siurblių trikdžių, yra išlaikoma perregulavimo amplitudė ir regulavimo laikas procesui perėjus iš pirmosios fazės į antrąją. Taikant klasikinį PI reguliatorių, kai šį procesą veikia nuostato pokytis ir paduodamų tirpalų siurblių trikdžiai, skirtingose proceso fazėse skiriasi perregulavimo amplitudės ir regulavimo laikas.

Literatūros šaltiniai

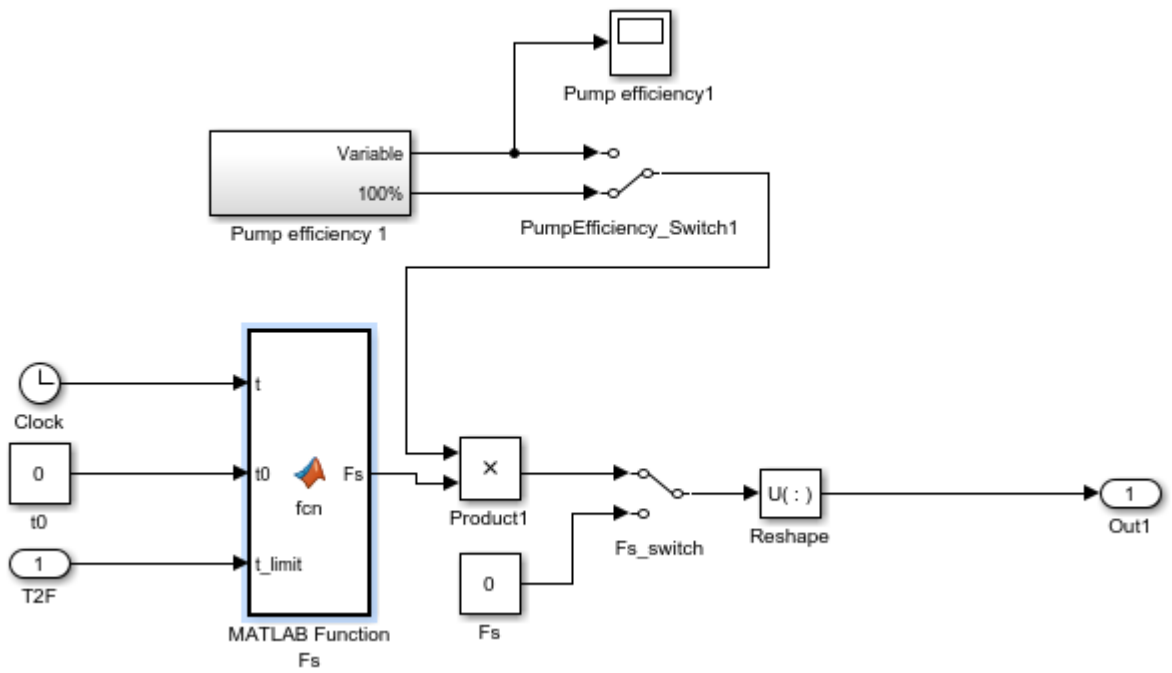
1. Ioan Dore Landau. Rogelio Lozano. Mohammed M'Saad. Alireza Karimi. *Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications. Second Edition.* – Springer-Verlag London Limited 2011. – 610p. [Žiūrėta 2018-05-29] Prieiga internetu:
https://doc.lagout.org/science/0_Computer%20Science/2_Algorithms/Adaptive%20Control%20Algorithms%2C%20Analysis%20and%20Applications%20%282nd%20ed.%29%20%205BLandau%2C%20Lozano%2C%20M%27Saad%20%26%20Karimi%202011-06-08%5D.pdf
2. Gregory K. McMillan, Robert A. Cameron. *Advanced pH Measurement and Control.* – ISA. 2005. – 294p.
3. Galvanauskas, V. (2009) *Adaptive pH Control system for Fed-Batch Biochemical Processes.* Information Technology and Control, ISSN 1392-124X, Vol.38, No.3, 225-231 [Žiūrėta 2018-05-23] Prieiga internetu:
itc.ktu.lt/index.php/ITC/article/download/12103/6751
4. *pH Measurement Electrode Basics.* [Žiūrėta 2018-06-05] Prieiga internetu:
https://www.omega.com/Green/pdf/pHbasics_REF.pdf
5. *Theory and Practice of pH Measurement.* [Žiūrėta 2018-06-05] Prieiga internetu:
<https://www.emerson.com/documents/automation/manual-theory-practice-of-ph-measurement-en-70736.pdf>
6. Andrius Nickus. Magistro baigiamasis darbas. “*Adaptyvi periodinio su pamaitinimu biotechnologinio proceso pH valdymo sistema*”
7. Levišauskas D., *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas.* Vilnius, 2008.
8. Christopher J. Bett. „*Gain-Scheduled Controllers*“. *The Electrical Engineering Handbook.* - Elsevier Inc., 2004. – 1227p.
9. *Parameter Scheduling and Adaptive Control of Nonlinear Processes.* [Žiūrėta 2019-05-16] Prieiga internetu:
<https://controlguru.com/parameter-scheduling-and-adaptive-control-of-nonlinear-processes/>
10. Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1), 252-265. doi:10.1021/i200032a041
11. Galvanauskas, V., Levišauskas D. „*Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas*“. 2008. 112p.

Priedai

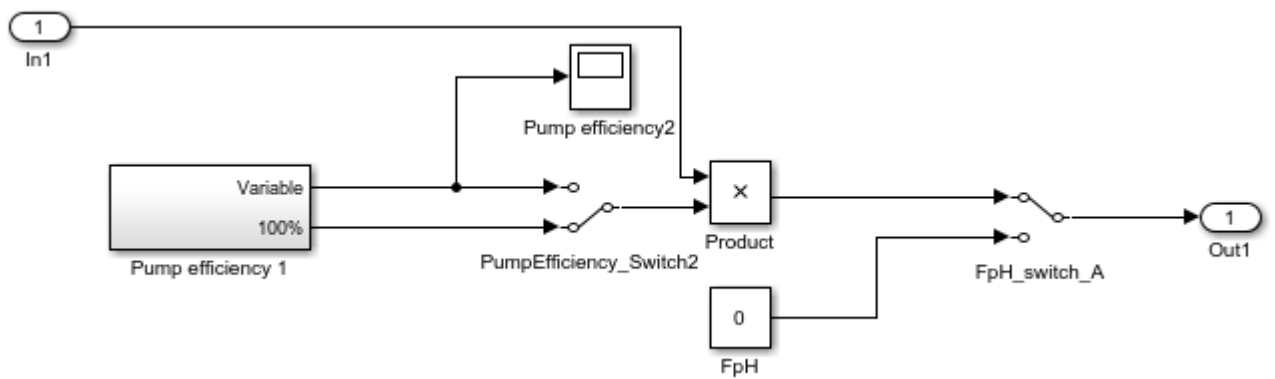
1 priedas. Sudaryto modelio schema



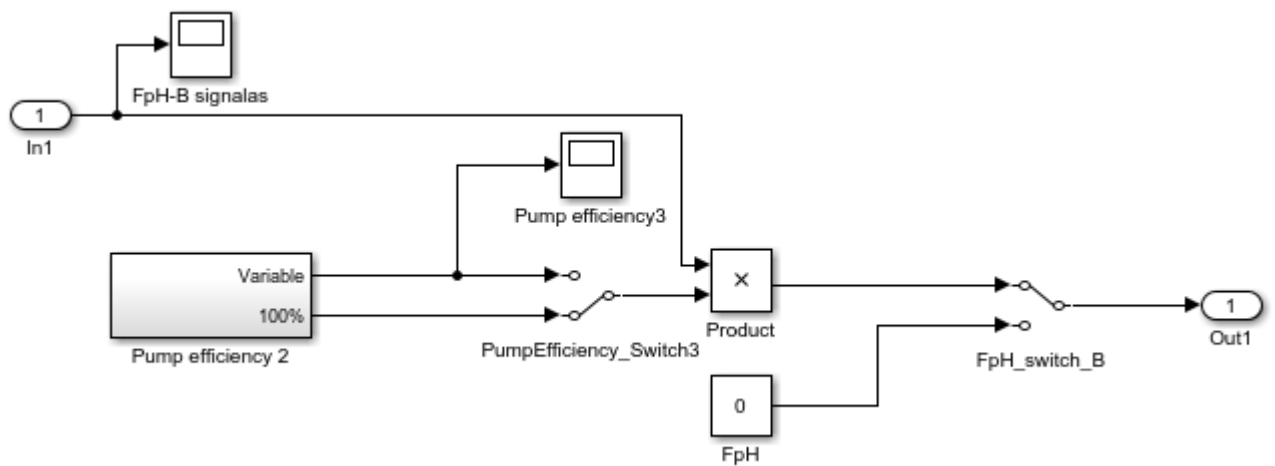
1 pav. Sudaryto modelio schema



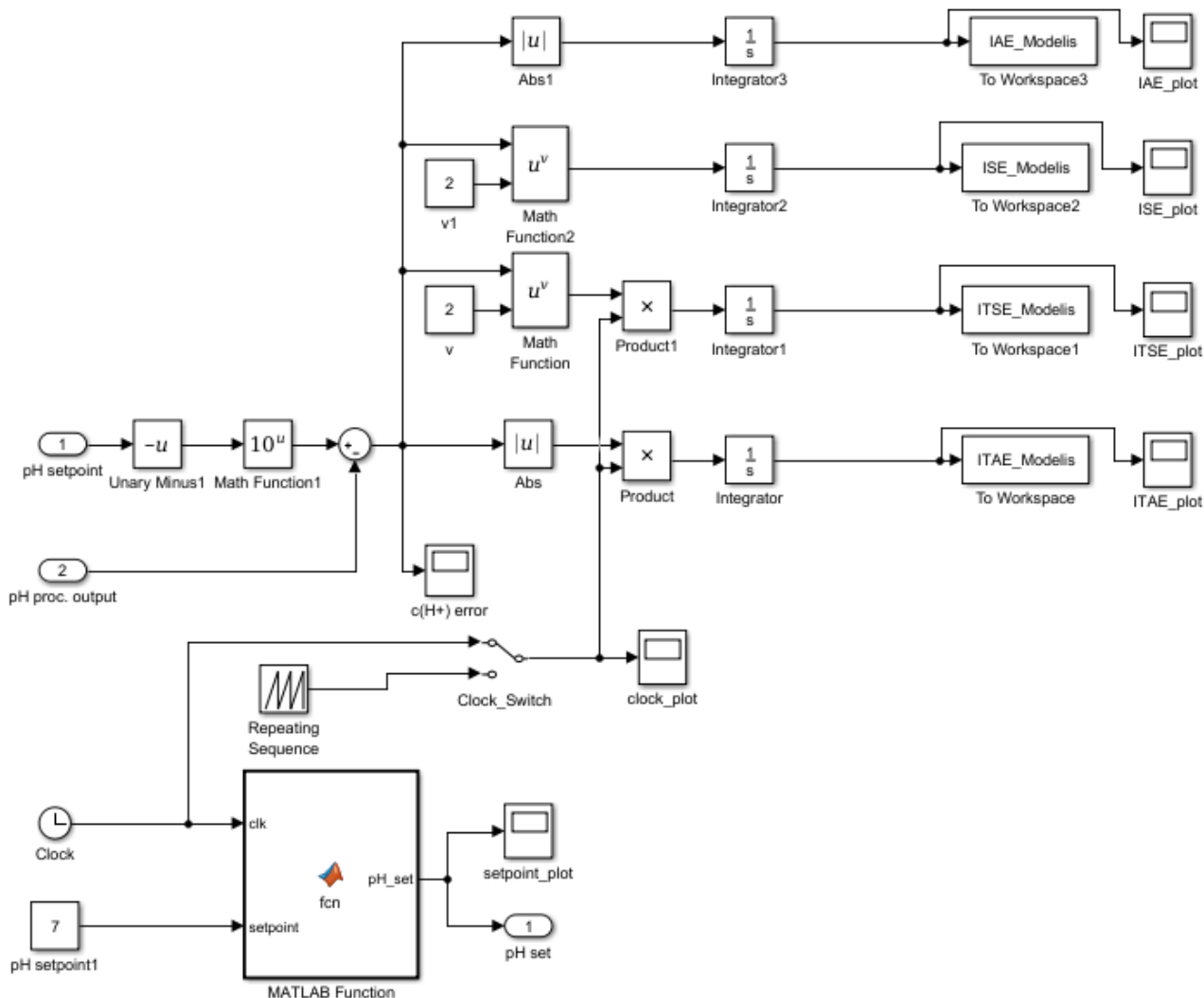
2 pav. Substrato pamaitinimo bloko schema



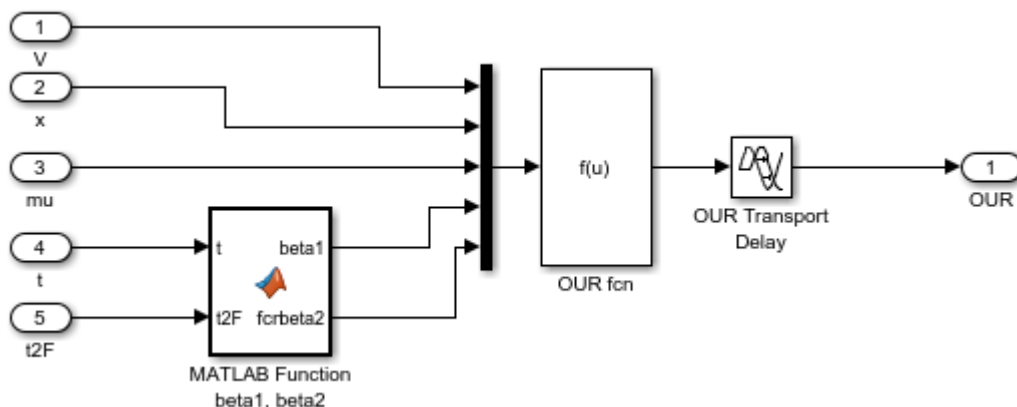
3 pav. Rūgšties tirpalo srauto formavimo bloko schema



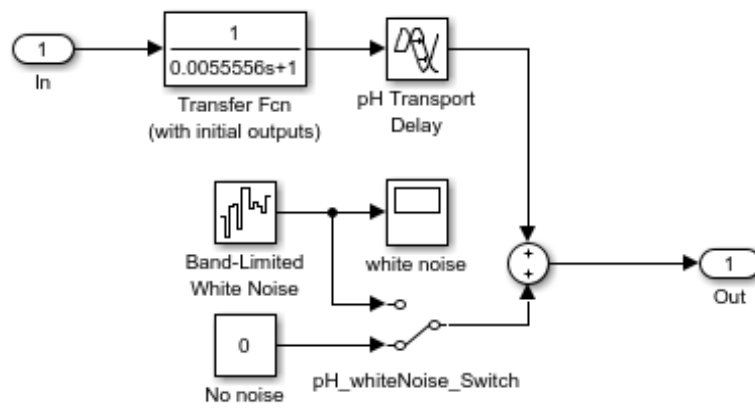
4 pav. Šarmo tirpalo srauto formavimo bloko schema



5 pav. Adaptyviojo PI regulatoriaus adaptacijos parametru optimizavimo blokas



6 pav. Deguonies suvartojimo apskaičiavimo blokas



7 pav. pH jutiklio signalo formavimo blokas

2 priedas. MATLAB Function Fs bloko kodas

```
function Fs = fcn(t, t0, t_limit)

S0 = 200;
x0 = 0.26;           %Kai t0 ir Fs=0, FpH=0; +0.06;
V0 = 5.0;           %Kai t0 ir Fs=0, FpH=0;
mu0= 0.63;          %Kai t0 ir Fs=0, FpH=0;

if (t<t0)
    Fs = 0;
elseif ((t>=t0)&&(t<=t_limit))
    Fs = x0*V0*exp(mu0*(t-t0))/S0;
else
    Fs = x0*V0*exp(mu0*(t_limit-t0))/S0;
end
```

3 priedas. α_1 ir α_2 parametru aprašymo bloko kodas

```
function [alfa1, alfa2] = fcn(t, t2F)

alfa1_1F = 0.422*10^(-7);
alfa2_1F = 0.011*10^(-7);

alfa1_2F = 0.4088*10^(-7);
alfa2_2F = 0.0179*10^(-7);

if t<t2F
    alfa1 = alfa1_1F;
    alfa2 = alfa2_1F;
else
    alfa1 = alfa1_2F;
    alfa2 = alfa2_2F;
end
```

4 priedas. β_1 ir β_2 parametru aprašymo bloko kodas

```
function [beta1, beta2] = fcn(t, t2F)

beta1_1F=0.8646;
beta2_1F=0.018;

beta1_2F=1.47;
beta2_2F=0.0038;

if t<t2F
    beta1 = beta1_1F;
    beta2 = beta2_1F;
else
```

```

    beta1 = beta1_2F;
    beta2 = beta2_2F;
end

```

5 priedas. Adaptyviojo PI reguliatoriaus adaptacijos parametru optimizavimo algoritmas

```

% Kr ir Ti Adaptacijos algoritmo parametru (gama1, gama2 ir gama3) paieska
% panaudojant "fminsearch" funkcija.
% Kr = Kr0 * gama3 * V; Kr0 - klasikinio PI reguliatoriaus Kr verte.
% Ti = gama1 / (gama2 + OUR)

```

```

clc;
clear all;

```

```

n=100; %Optimizavimo algoritmo iteraciju skaiciaus limitas;

```

```

%0. Apibreziami adaptacijos parametrai sudarytam modeliui:
global gama1_sim gama2_sim gama3_sim;

```

```

%0.1 Paieskos parametrai:

```

```

simTime=10; %Modeliavimo laikas: 10h
simStep=10^(-4); %Modeliavimo zingsnis;
simTimeArr=0:simStep:simTime; %Modeliavimo laiko matrica;
simTimeArr=simTimeArr'; %keiciamas laiko matricos formatas;

```

```

%0.2 Sudaromas Simulink modeliui tinkamas adaptacijos parametru formatas.

```

```

gama1_sim(:,1)=simTimeArr;
gama1_sim(:,2)=1;
gama2_sim(:,1)=simTimeArr;
gama2_sim(:,2)=1;
gama3_sim(:,1)=simTimeArr;
gama3_sim(:,2)=1;

```

```

%1. Apibreziami pradiniai gama1, gama2 ir gama3.

```

```

g1_0=1;
g2_0=1;
g3_0=1;

```

```

%2. Optimizavimo algoritmas:

```

```

options = optimset('Display','iter', 'PlotFcns',@optimplotfval, ...
    'MaxIter', n, ...
    'TolX', 1.e-2, ...
    'TolFun', 1.e-2);
[g, fval] = fminsearch ...
    (@(g123) model(g123), [g1_0 g2_0 g3_0], options)

```

```

%3. Modeliavimo funkcija:

```

```

function f=model(x)

```

```

global gama1_sim gama2_sim gama3_sim;

```

```

%optimizuojamieji dydziai:

```

```

g1=x(1);
g2=x(2);
g3=x(3);

```

```

% cia x - fminsearch naudojamas g123

%Paieskos parametrai:
simTime=10; %Modeliavimo laikas: 10h
simStep=10^(-4); %Modeliavimo zingsnis;
simTimeArr=0:simStep:simTime; %Modeliavimo laiko matrica;
simTimeArr=simTimeArr'; %keiciamas laiko matricos formatas;

%Sudaromas Simulink modeliui tinkamas adaptacijos parametru formatas.
gama1_sim(:,1)=simTimeArr;
gama1_sim(:,2)=g1;
gama2_sim(:,1)=simTimeArr;
gama2_sim(:,2)=g2;
gama3_sim(:,1)=simTimeArr;
gama3_sim(:,2)=g3;

%Paleidziamas modeliavimas.
sim('Modelis', simTime);

%IAE optimizavimas:
%f=IAE_Modelis(end);

%ISE optimizavimas:
%f=ISE_Modelis(end);

%ITAE optimizavimas:
%f=ITAE_Modelis(end);

%ITSE optimizavimas:
f=ITSE_Modelis(end);
end

```