



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**pH lygio reaktoriuje valdymo sistemos matematinis
modeliavimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Andrius Bartkevičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Jolanta Repšytė

Vadovė

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

pH lygio reaktoriuje valdymo sistemos matematinis modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Andrius Bartkevičius

Projekto autorius

Lekt. dr. Jolanta Repšytė

Vadovė

Doc. dr. Leonas Balaševičius

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Andrius Bartkevičius

pH lygio reaktoriuje valdymo sistemos matematinis modeliavimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Andrius Bartkevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Bartkevičius, Andrius. pH lygio reaktoriuje valdymo sistemos matematinis modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas. Vadovė Lekt. dr. Jolanta Repšytė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: adaptyvus PI reguliatorius, pH reguliavimas, Ziglerio ir Nikolso metodas, Niutono metodas.

Kaunas, 2023. 49 p.

Santrauka

Šiame darbu buvo sudarytas matematinis pH lygio reguliavimo modelis, kurio dydžių priklausomybės aprašomos diferencialinėmis lygtimis. Matematinio modelio pH skaičiavimui nuo išėigos kintamųjų naudojamas iteraciniu skaičiavimu pagrįstas Niutono (*angl. Newton*) metodas. Palyginus skirtingus reguliatoriaus derinimo būdus dėl gautų geriausių pereinamojo proceso kokybinių parametru pasirinktas Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) derinimo metodas, kuris pritaikomas PI reguliatoriui. Atlikus minėto reguliatoriaus derinimą sudaroma adaptyvi valdymo sistema, kuri priklausomai nuo suskaičiuotos išėigos pH vertės keičia P ir I dedamasias. Įvedant nuostato pokyčius ir pritaikius trikdžius sukurtos adaptyvios valdymo sistemos kokybė buvo palyginta su paprastuoju PI reguliatoriumi. Cheminio proceso imitacinis modelis sudaromas *MATLAB Simulink* aplinkoje.

Bartkevičius Andrius. Mathematical Modelling and Investigation of pH Level Control System in Reactor. Master's Final Degree Project. Supervisor lekt. dr. Jolanta Repšytė; Faculty of Electrical and Electronics, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: adaptive PI controller, pH control, Ziegler–Nichols method, Newton method.

Kaunas, 2023. 49 p.

Summary

In this work, a mathematical model of pH level regulation was developed, where the dependencies of the variables are described by differential equations. The Newton method, based on iterative calculations, is used for the calculation of the pH in the mathematical model from the input variables. After comparing different methods of controller tuning, the Ziegler-Nichols tuning method was chosen due to its better qualitative parameters of the transient process. This method is applied to the PI controller. After tuning the mentioned controller, an adaptive control system is created, which adjusts the proportional and integral terms based on the calculated output pH value. By introducing setpoint changes and applying disturbances, the quality of the adaptive control system is compared to that of the simple PI controller. A simulation model of the chemical process is created in the MATLAB Simulink environment.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Tiriamojo proceso panaudojimas	12
1.2. Proceso valdymo problemos.....	13
1.2.1. Titracijos kreivė.....	13
1.2.2. Įtekėjimo srauto valdymo svarba.....	14
1.3. Skirtingų reguliavimo metodų apžvalga.....	15
1.3.1. PID regulatoriaus derinimo metodai	15
1.3.1.1. Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) metodas.....	15
1.3.1.2. <i>Cohen- Coon</i> metodas	16
1.3.1.3. <i>Kappa-Tau</i> derinimo metodas	17
1.4. Proceso valdymo būdai.....	19
1.4.1. Stiprinimo numatymo valdymas.....	19
1.4.2. Netiesioginis adaptyvusis valdymas.....	20
1.4.3. Tiesioginis adaptyvusis valdymas	20
2. Proceso matematinio modelio sudarymas	21
2.1. Proceso dinamiką aprašančios diferencialinės lygtys.....	21
2.2. pH vertės išvedimas naudojant <i>Niutono</i> (<i>angl. Newton</i>) metodą.....	23
2.3. Proceso matematinio modelio be valdymo realizavimas	26
2.4. Paprastojo PI regulatoriaus sudarymas.....	28
2.5. Adaptvyviojo PI regulatoriaus sudarymas	32
3. Reguliavimo sistemų tyrimas.....	35
3.1. Matematinio modelio realizacija <i>Matlab Simulink</i> aplinkoje.....	35
3.1.1. Sudaryto matematinio modelio proceso blokas.....	35
3.1.2. Apibrėžiamos tyrimų ribos	35
3.2. Tiriamos ARS reakcija į nuostato pokytį	36
3.3. Tiriamos ARS reakcija į trikdį	44
Išvados ir rezultatai.....	47
Literatūros sąrašas	48
Priedai.....	50
1 priedas. Proceso matematinio modelio struktūra.....	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. <i>Cohen-Coon</i> metodu paremtos derinimo taisyklės	17
2 lentelė. Proceso konstantos ir kintamieji [4]	23
3 lentelė. Reguliatoriaus derinimo formulės.	29
4 lentelė. Skirtingų derinimo metodų taikymo metu gauti PI reguliatoriaus parametrai	30
5 lentelė. PI reguliatoriaus parametrai gauti naudojant Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) metodą	32
6 lentelė. Tyrimo metu įvedamų trikdžių vertės	36
7 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 25 pav.	37
8 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 26 pav.	38
9 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 27 pav.	39
10 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 28 pav.	39
11 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 29 pav.	40
12 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 30 pav.	41
13 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 31 pav.	41
14 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 32 pav.	42
15 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 33 pav.	43
16 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai keičiant nuostato vertę	43
17 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai įvedant trikdžius 36 pav.	45

Paveikslų sąrašas

1 pav. pH skalė [22]	12
2 pav. Netiesiškai kintančio pH pavyzdys (titracijos kreivė).....	13
3 pav. Laminarinio tekėjimo pasiskirstymas vamzdelio skerspjūvyje [20]	14
4 pav. Turbulentinio tekėjimo pasiskirstymas vamzdelio skerspjūvyje [20].....	14
5 pav. PID regulatoriaus parametrų įtaka proceso valdomam signalui	15
6 pav. Proceso parametrai nustatyti naudojant Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) taisyklės, šie parametrai nustatomi iš šuolinės funkcijos	16
7 pav. PID regulatoriaus atsakas valdant pH lygį naudojant Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) derinimo metodą [3]	16
8 pav. PID regulatoriaus atsakas valdant pH lygį naudojant <i>Cohen-Coon</i> derinimo metodą [3]....	17
9 pav. Stiprinimo numatymo valdymas	19
10 pav. Netiesioginis adaptyvusis savaime susireguliuojantis valdymas	20
11 pav. pH neutralizavimo sistema	21
12 pav. Parenkamo pradinio taško $[H^+]$ vertė [15]	24
13 pav. Liestinės brėžimas į funkciją ištačius pradinę $[H^+]$ vertę [15]	25
14 pav. Cheminio reaktoriaus imitacinis modelis sudarytas <i>Matlab Simulink</i> aplinkoje	26
15 pav. Eksperimentinė ir imitaciniame modelyje gautos titracijos kreivės keičiant įtekančio q_2 silpno šarmo srautą.....	27
16 pav. Eksperimentinė ir imitaciniame modelyje gautos titracijos kreivės keičiant įtekančio q_3 stipraus šarmo srautą	27
17 pav. Pereinamojo proceso dinamika esant skirtingiems q_3 įtekėjimo srautams	28
18 pav. PI regulatoriaus pereinamojo proceso valdymas suderinus reguliatorių <i>Cohen-Coon</i> , <i>Kappa-Tau</i> , Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) metodais esant nuostatui 7 pH , kuriam įvedamas nuostato pokytis +0,2 pH.....	30
19 pav. Pereinamojo proceso grafikas naudojant 4 lentelėje pateiktus Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) metodu apskaičiuotus regulatoriaus parametrus keičiant nuostato vertę nuo 5,8 pH į 6 pH.	31
20 pav. Pereinamojo proceso grafikas naudojant 4 lentelėje pateiktus Ziglerio ir Nikolso (<i>angl. Ziegler-Nichols</i>) metodu apskaičiuotus regulatoriaus parametrus keičiant nuostato vertę nuo 8 pH į 8,2 pH.	31
21 pav. Stiprinimo numatymo valdymo sistemos struktūra [7]	32
22 pav. Proporcinės dedamosios P priklausomybės grafikas nuo pH vertės	33
23 pav. Integralinės dedamosios I priklausomybės grafikas nuo pH vertės	34
24 pav. ARS modelis <i>Matlab Simulink</i> aplinkoje	35
25 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 6 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6	37
26 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 7 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6	38
27 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 8 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6	38
28 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 6 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7	39
29 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 7 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7	40

30 pav. pH nuostatui 8 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7	40
31 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 6 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8	41
32 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 7 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8	42
33 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 8 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8	42
34 pav. Įtekančios rūgšties q_1 trikdžio grafikas	44
35 pav. Įtekančio šarmo q_2 trikdžio grafikas	44
36 pav. ARS sistemos reakcija, įvedant trikdžius q_1 ir q_2	45
37 pav. Diferencialinių lygčių realizacija DEE bloke	50
38 pav. Adaptyvaus PI regulatoriaus struktūra	50
39 pav. Paprasto PI regulatoriaus struktūra	51
40 pav. Cheminio proceso sudarytas modelis	51
41 pav. Eksponentinis filtras	51
42 pav. Vožtuvo perdavimo funkcija su neigiamu apribojimu	51
43 pav. Niutono metodo realizacijos struktūra	51

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ARS– automatinio reguliavimo sistema;

PID– proporcinis-integruojantis-diferencijuojantis reguliatorius;

PI– proporcinis-integralinis reguliatorius;

IAE– suminė integralinė reguliavimo paklaida (*angl. Integral of the Absolute Value of the Error*).

Įvadas

Kuriant pH lygio reguliavimo sistemas yra susiduriama su keletu problemų. Pirmoji, esminė problema, tai pH vertės kitimo netiesiškumas nuo įtekančių reagentų srautų. Šią priklausomybę atspindi titravimo kreivė, kuri yra vienas iš pagrindinių informacijos šaltinių identifikuojant sistemos netiesiškumo stiprumą ir parenkant optimalų valdymo metodą. Kita problema su kuria susiduriama atliekant pH sistemos valdymą yra matematinio modelio formulavimas ir sudarymas, nes net ir menkiausi pokyčiai modelyje gali stipriai pakeisti proceso dinamiką. Netiesinės reguliavimo sistemos neapsiriboja tik šiomis problemomis, kiekviena sistema yra individuali ir gali sukelti įvairaus sudėtingumo problemų. Dėl šių priežasčių atliekant pH sistemos valdymo kūrimą būtina žinoti ne tik sistemos reguliavimo sprendimą, bet ir būti susipažinus su praktiniais pH reguliavimo sistemos galimais trikdžiais ir problemomis. Taigi, įvertinus kylančias problemas, atlikus reikiamus skaičiavimus ir susipažinus su galimomis valdymo sistemos šiame darbe bus realizuojama adaptyvioji pH reguliavimo sistema [10], [11], [12], [13].

Darbo tikslas– sudaryti pH lygio reaktoriuje matematinį modelį ir jo pagalba ištirti valdymo sistemą.

Šiam tikslui pasiekti išsikelti uždaviniai:

1. sudaryti pH lygio reaktoriuje matematinį modelį ir jį realizuoti Matlab/Simulink aplinkoje;
2. išskaičiuoti pH lygį tiesiogiai iš vandenilio koncentracijos, kuri priklauso nuo susidariusios bendros krūvių sumos ir esančių jonų koncentracijos;
3. parinkti tinkamą reguliavimo metodą;
4. ištirti pH lygio reaktoriuje reguliavimo sistemos pereinamuosius procesus skirtinguose darbo taškuose.

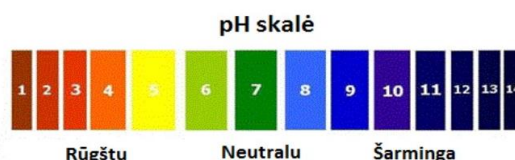
1. Literatūros apžvalga

1.1. Tiriamojo proceso panaudojimas

Biocheminiai procesai yra vieni sudėtingiausių procesų lyginant juos su kitais technologiniais procesais. Šiuose procesuose vyksta įvairios biocheminės reakcijos, kurios daro įtaką produkto kokybei, kiekiui ir sąnaudoms reikalingoms išgauti galutinį produktą pasirinktų parametrų ribose. Šiuo atveju pH lygio valdymas dažniausiai yra naudojamas cheminiuose ir/ar biotechnologiniuose procesuose. Pavyzdžiui, tam tikrų nuotekų pH lygis turi atitikti aplinkosaugos nustatytas ribas, o kad šios ribos atitiktų nuostatus yra naudojama pH reguliavimo sistema. Šios sistemos reguliavimo tikslumui nėra keliami aukšti reikalavimai. Kur kas tikslesnės ir sudėtingesnės pH reguliavimo sistemos yra naudojamos farmacijos produktams gaminti. Tačiau pH reguliavimo sistemos neapsiriboja tik šiais procesais. Tai gali būti naudojama fermentacijos procesuose, paviršiaus apdirbimo procesuose, dažų gamyboje, buitinės chemijos gamyboje ir taip pat vandens valymo procesuose. pH arba vandenilio potencialas nusako vandenilio jonų (H^+) koncentraciją tirpale, kuri matuojama moliais litre. PH vertė gali svyruoti nuo 0 iki 14, o ši kreivė pateikiama 1 pav. pH vertės ribas galima padalinti į dvi lygias dalis, esant pH vertei nuo 0 iki 7 tirpalas yra rūgštinis, o vertei varijuojant nuo 7 iki 14 yra nusakoma, kad tirpalas yra šarminis. pH vertė 7 yra neutralus pusiausvyros lygis, kuriuo ir bus varijuojama šiame darbe. Daugelyje gamybos sričių vyksta pH neutralizavimo procesas, kurio tikslas yra išlaikyti neutralia pH vertę ir sumažinti galimų nuotekų poveikį aplinkai arba išgauti reikiamos pH vertės tirpalą. Paprastai išlaikyti vertę lygia 7 pH yra gana sudėtinga, todėl šia verte yra stengiamasi varijuoti tarp kritinių taškų nuo 6 iki 8 pH, kuriuos lemia stiprių rūgščių ir šarmų tarpusavio santykis. Šiame darbe bus realizuojama reguliavimo sistema, kurios taikymą nesudėtingai galėtų suprasti valdymo specialistai. Įprastai reguliavimas yra atliekamas naudojant paprastuosius PID reguliatorius, tačiau šiems reguliatoriams reikia nemažai laiko kol vertė pasiekia pasirinktą ribą. Tobulėjant technologijoms minėti reguliatoriai yra pakeičiami kitais derinimo būdais ir metodais, taip pat yra naudojami skirtingi valdikliai. Atsižvelgiant į tokios sistemos netiesiškumą, valdymo komplikuotumą ir išsikeltas sąlygas galima išskirti keletą valdymo sistemų ir jų strategijos būdų:

- adaptyvaus valdymo sistema;
- tiesioginis adaptyvus valdymas;
- netiesioginis adaptyvus valdymas.

Sukūrus optimalia pH lygio palaikymo sistemą būtų galima užtikrinti maksimaliai mažus naudojamų reagentų nuostolius ir išgauti kokybišką produktą su mažiausiais nuostoliais [3], [4], [5], [2], [21].



1 pav. pH skalė [22]

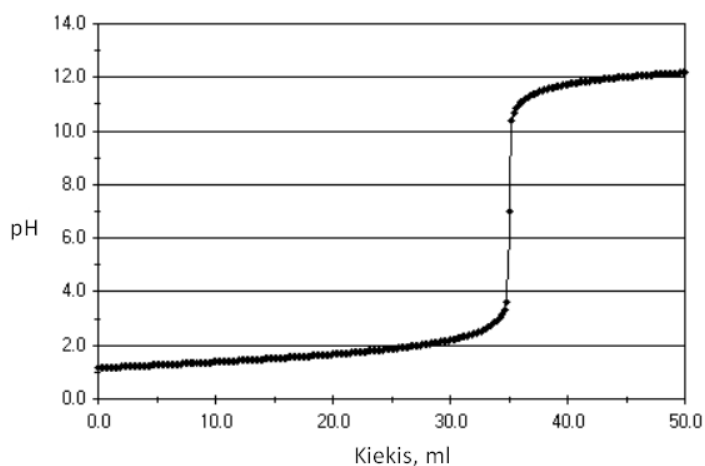
Toliau pateikta formulė (1) pagal kurią skaičiuojama pH vertės priklausomybė nuo $[H^+]$ vandenilio jonų koncentracijos [23].

$$pH = -\log_{10}[H^+]. \quad (1)$$

1.2. Proceso valdymo problemos

1.2.1. Titracijos kreivė

pH neutralizavimo procesas pasižymi dideliu netiesiškumu. Dėl savo netiesiškumo savybių pasirinktos reikšmės realizavimui nepakanka naudoti standartinio PI reguliatoriaus. pH titracijos kreivė puikiai atvaizduoja valdomos sistemos netiesiškumus. Ši priklausomybė vaizduoja pH jautrumą ir kitimo amplitudę tam tikrose ribose, kuri kinta priklausomai nuo sumaišytų reagentų koncentracijų, tūrio ir kitų matuojamų verčių.



2 pav. Netiesiškai kintančio pH pavyzdys (titracijos kreivė)

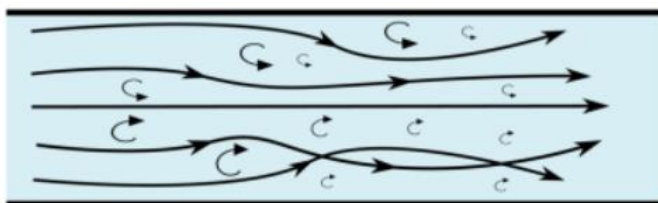
Verta paminėti, kad titracijos kreivė nėra simetriška. 2 paveikslėlyje yra matyti, kad didžiausias sistemos netiesiškumas yra pastebimas pH reikšmei esant nuo 3 pH iki 10 pH. Šios ribos yra skirtingos, priklausomai nuo rūgšties ir bazės koncentracijų. Šiuo atveju sistema yra stipriai netiesinė [2], [3].

1.2.2. Įtekėjimo srauto valdymo svarba

pH lygio palaikymo sistemose yra svarbu tinkamai reguliuoti įtekėjimo ir ištekėjimo srautus. Tam yra naudojami įvairūs vožtuvai. Nesklandumai ir problemos atsiranda tada, kai būna naudojami mažo diametro vožtuvai. Dėl mažo ir netolygaus reagento pratekėjimo ir galimo lipnumo šių vožtuvų sienelės pamažu pasidengia tirpalu ir taip sumažina vožtuvo pratekėjimo plotą iki kol jis tampa lygus nuliui. Tai yra ypač aktualu jeigu vožtuvas naudojamas sistemoje, kurios pratekančio tirpalo kiekio tikslumui keliami aukšti reikalavimai. Toliau aprašytas tirpale esančių skysčio dalelių pasiskirstymas tekant vamzdeliais. [14], [19].



3 pav. Laminarinio tekėjimo pasiskirstymas vamzdelio skerspjūvyje [20]



4 pav. Turbulentinio tekėjimo pasiskirstymas vamzdelio skerspjūvyje [20]

- **Laminarinis tekėjimas**

Šio tipo srautas pasižymi lygiagrečiu skysčio dalelių išsidėstymu, kai susidaro atskiri sluoksniai. Susidarantys sluoksniai juda tvarkingai, srautas pasižymi mažu greičiu ir impulsu, šis pratekėjimas dažniausiai yra pastebimas tais atvejais, kai tirpalas teka siauru vamzdeliu.

- **Turbulentinis tekėjimas**

Priešingai nei laminarinis, turbulentinio srauto metu skysčio dalelės juda chaotiškai, susidaro sūkuriai. Šio tipo srautas pasižymi didesniu greičiu ir impulsu. Pastebimas kai skystis teka didesniu kanalu arba susiduria su kliūtimis.

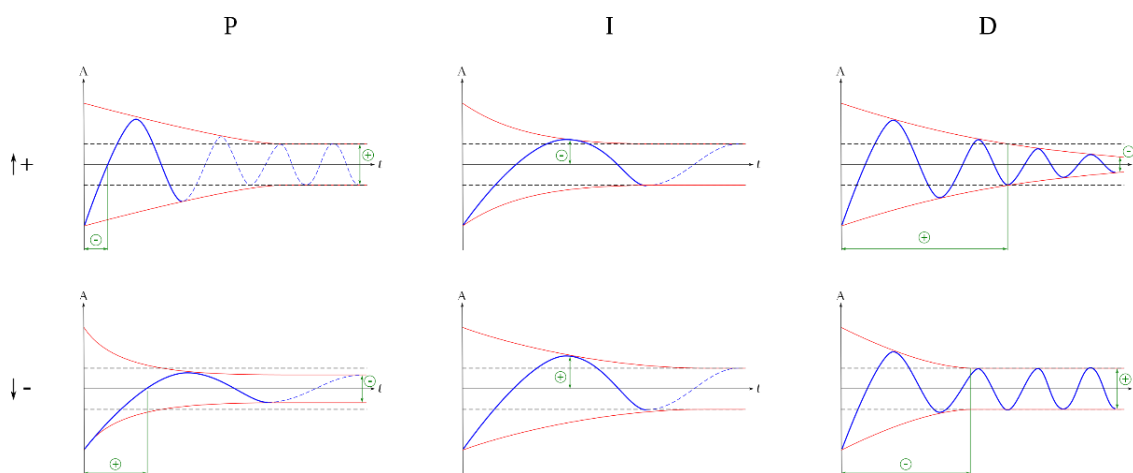
1.3. Skirtingų reguliavimo metodų apžvalga

1.3.1. PID reguliatoriaus derinimo metodai

Pagrindinis siekis pH valdyme yra užduoto lygio reguliavimas, dažniausiai yra stengiamasi palaikyti užduotą vertę. Šiam lygiui palaikyti gali būti naudojami P, PI, PD ar PID reguliatoriai, kurių derinimas taip pat gali būti atliktas naudojant įvairius metodus. PID reguliatorius susideda iš 3 grandžių:

- proporcinės;
- integruojančios;
- diferencijuojančios.

Kiekvieno parametro vertė turi tam tikrą poveikį valdomam signalui, šių parametru įtaka valdomam signalui pateikiama 5 pav.

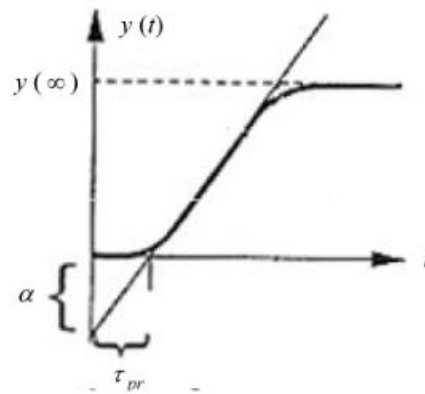


5 pav. PID reguliatoriaus parametru įtaka proceso valdomam signalui

pH reguliavimo procesas yra gana sudėtinga problema, kuria galima išspręsti naudojant įvairius reguliavimo būdus ir įvairius reguliatorius. Šiuo atveju PID reguliatorius taip pat turi keletą derinimo metodų. Remiantis konkrečiu straipsniu [5], kuriame buvo atlikti skirtingi metodai PID parametru verčių derinimui galime palyginti gautas vertes ir naudotus metodus [3], [5].

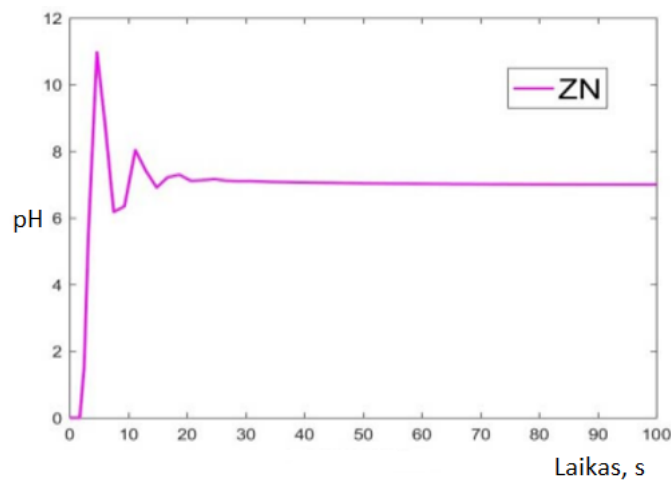
1.3.1.1. Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodas

Pirmasis straipsnyje [5] naudotas Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) verčių derinimo metodas. Naudojant šį metodą apskaičiuotos PID reguliatoriaus vertės. Šis metodas išsiskiria į du galimus derinimo būdus, tai laiko srities ir dažnių. Šie metodai remiasi dviem proceso dinamika apibūdinančiais parametrais: stiprinimu ir trukme. Parametru derinimui yra sudarytos formulės, kurios turi atitikti reikalavimą, kad svyravimų amplitudės slopimo santykis neviršytų 0,25 [5], [28], [32].



6 pav. Proceso parametrai nustatyti naudojant Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) taisyklės, šie parametrai nustatomi iš šuolinės funkcijos

Atliekant konkrečios sistemos reguliavimą naudojant minėtą metodą straipsnyje buvo pateiktas pH nusistovėjimo procesas [2], [5].



7 pav. PID regulatoriaus atsakas valdant pH lygį naudojant Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) derinimo metodą [3]

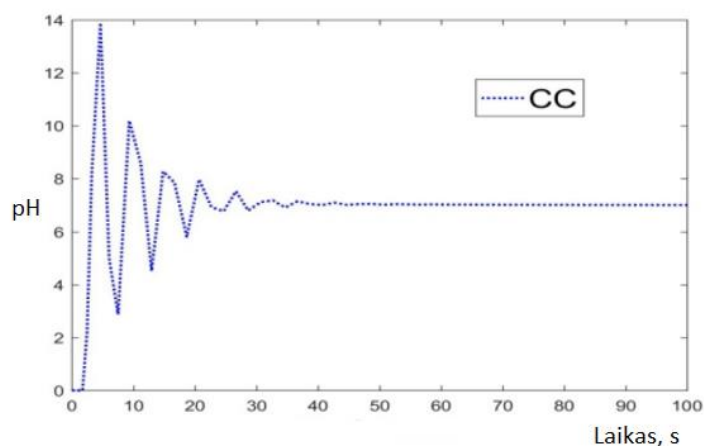
1.3.1.2. Cohen- Coon metodas

Cohen– Coon sudarė tikslesnes 0,25 slopimo laipsnio kriterijams derinimo formules. Šios formulės kaip ir Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metode yra paremtos prielaida, kad procesas aprašomas pirmosios eilės su vėlavimu modeliu. Šio metodo derinimo taisyklės pateiktos 1 lentelėje. Tačiau, kaip jau minėtame Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metode ir Cohen- Coon metode derinimo taisyklės turi trūkumą, tai gana didelis sistemos jautrumas proceso parametrų pokyčiams. Žemiau pateikta 1 lentelė su aptarto metodo derinimo taisyklėmis, vėlavimo trukmės ir laiko pastoviosios santykis kinta šiame diapazone $0,1 < \tau_{pr} / T_{pr} < 1,0$ [3], [5], [31].

1 lentelė. *Cohen-Coon* metodu paremtos derinimo taisyklės

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

Žemiau pateiktame 9 pav. yra matyti regulatoriaus atsakas valdant pH lygį kai regulatoriaus derinimas buvo atliktas naudojant *Cohen-Coon* taisykles. Iš 8 pav. matyti, kad gaunami slopstantys švytavimai, procesas nusistovi, tačiau matyti, kad gaunama didelė perreguliavimo vertė. Galima teigti, kad anksčiau naudoto Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodu suderintas regulatorius procesą reguliavo kokybiškiau [5].



8 pav. PID regulatoriaus atsakas valdant pH lygį naudojant *Cohen-Coon* derinimo metodą [3]

1.3.1.3. *Kappa-Tau* derinimo metodas

Kappa-Tau metodo derinimo kriterijus yra automatinio reguliavimo sistemos nejautrumas proceso neapibrėžtumams. Regulatoriaus parametrai yra parenkami taip, kad uždarojo kontūro sistema nebūtų jautri proceso dinaminių savybių pokyčiams. Šis derinimo metodas dažniausiai pritaikomas pramoniniams objektams, kur dinaminės proceso savybės gali kisti dėl nekontroliuojamų veiksnių poveikio. Norint nustatyti sistemos jautrumą *Kappa-Tau* metodu yra naudojamas jautrumo matas, kuris nusako maksimalų jautrumą M_s [3], [5] [30].

$$M_s = \max \left| \frac{1}{1+W_{pr}(j\omega)W_r(j\omega)} \right| \quad (2)$$

Iš lygties (2) $W_{pr}(j\omega)$ ir $W_r(j\omega)$ yra atitinkamai proceso ir reguliatoriaus perdavimo funkcijos. Yra sudarytos dvi *Kappa-Tau* metodo versijos. Viena iš jų paremta šuoline reakcijos kreive, o kita dažnine proceso reakcija. Abiem atvejais derinant reguliatoriaus parametrus naudojami išvestiniai proceso parametrai, kuria atspindi dinamines proceso savybes, tai normuotas vėlavimas (τ) arba stiprinimo santykis (K). Maksimalus jautrumas (M_s) naudojamas kaip derinimo kriterijus ($M_s \leq M_{s, \max}$).

- *šulinės reakcijos metodas*. Čia procesas apibūdinamas statiniu stiprinimu (K_{pr}), atstojamuoju vėlavimu (τ_{pr}), atstojamąja laiko pastoviąją (T_{pr}) ir parametru $\alpha = K_{pr}(\tau_{pr}/T_{pr})$. Lygtyje esantys parametrai nustatomi iš proceso reakcijos kreivių grafiškai. Normuotas vėlavimas apibrėžiamas naudojant formulę:

$$\tau = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} \quad (3)$$

- *dažnio srities metodas*. Čia procesas apibūdinamas statiniu stiprinimu (K_{pr}), ribiniu stiprinimo koeficientu (K_u) ir ribiniu periodu (T_u). Reguliatoriaus parametrai pateikti santykinėje stiprinimo forma, kurio forma pavaizduota 3 lygtyje [3], [5].

$$K = \frac{1}{K_{pr} + K_u} \quad (4)$$

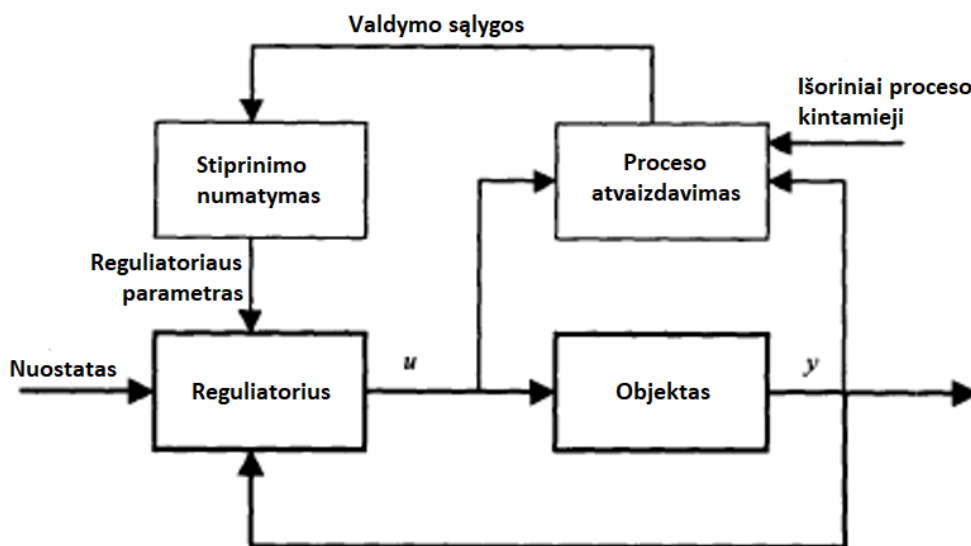
1.4. Proceso valdymo būdai

1.4.1. Stiprinimo numatymo valdymas

Stiprinimo numatymo valdymas– šiam valdymo būdai valdiklio parametrai yra apskaičiuojami iš anksto skirtingiems galimiems scenarijams. Šis skaičiavimas gali būti pagrįstas jau žinomu netiesiniu modeliu, kuris tampa tiesiniu kiekviename atskirame darbo taške arba pagrįstas tiesiniais modeliais, kurie naudojami skirtingais darbo režiais. Modelio parametrai yra pateikiami matricine forma. Planavimo kintamasis parenka kokios valdymo parametru vertės bus naudojamos realiuoju laiku. Kadangi šis valdymo būdas nėra parentas uždarojo kontūro valdymo sistema t.y. tiesioginio išėjimo nestebime. Parenkant stiprinimo koeficientus yra stebimos sąlygos sudarytos pagal proceso veikimą. Šios jau iš anksto apskaičiuotos sąlygos yra parenkamos iš „Reikšmių plano“ ir tada perduodamos valdikliui. Parenkant stiprinimo koeficientus iš jau apskaičiuotų verčių sąrašo yra įvertinamos įvairios proceso veikimo sąlygos. Stiprinimo verčių sąrašas yra sudaromas dviem žingsniais:

- Apskaičiuojamos tinkamos stiprinimo koeficientų reikšmės;
- Valdiklio konfigūravimas įvairioms veikimo sąlygoms.

Pagrindinė valdiklio derinimo užduotis yra parinkti tinkamą stiprinimo koeficientą. Dažniausiai tai atliekama remiantis proceso sistemos fizinėmis žiniomis. Kontroliuojant procesą išgaunamas šiuo atveju produkto gamybos greitis taip pat gali būti pasirenkamas kaip vienas iš galimų stiprinimo kintamųjų. Kai jau yra žinomos stiprinimo vertės yra suprojektuojamas valdiklio darbo režimu darbas skirtinguose sistemos veikimo dalyse. Atliekant tokio valdiklio projektavimą yra skiriamas ypatingas dėmesys perėjimam tarp skirtingų valdiklio eksploatavimo sąlygų. Verčių parinkimas tam tikriems režimams yra gana nesudėtingas procesas. Tokios sistemos privalumas yra greita reakcija į proceso pokyčius ir greitas stiprinimo verčių parinkimas. Vienas iš sistemos trūkumų yra grįžtamojo ryšio nebuvimas, kuris galėtų kompensuoti parinkto stiprinimo koeficiento vertę [1], [5].



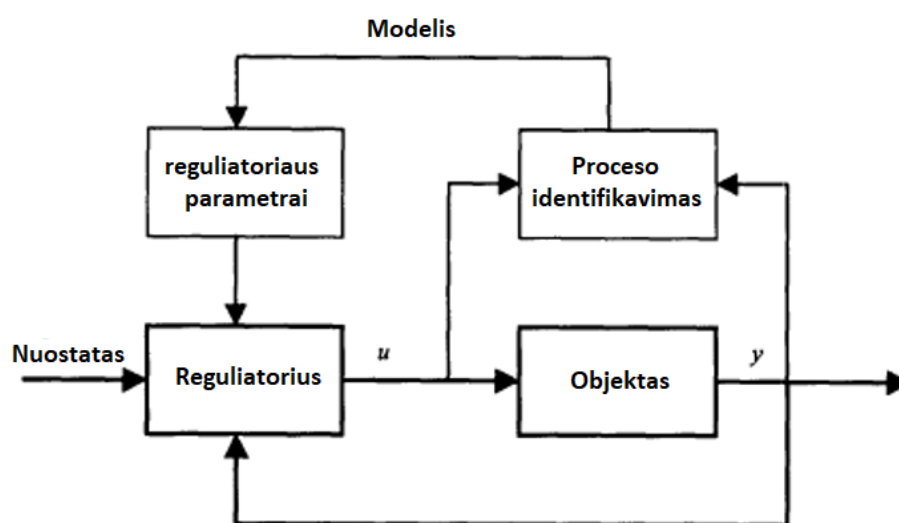
9 pav. Stiprinimo numatymo valdymas

1.4.2. Netiesioginis adaptyvusis valdymas

Netiesioginis adaptyvusis valdymas– šios sistemos vienas iš pagrindinių kriterijų yra optimalaus valdymo našumo nustatymas, kuris reguliuojamas atsižvelgiant į suprojektuoto valdiklio kriterijus ir gaunama proceso informaciją. Netiesioginis adaptyvusis valdymas gali būti išskirtas į 3 etapus:

- proceso identifikavimas (kai sistema yra uždaro kontūro);
- valdiklio konstrukcija;
- valdiklio verčių reguliavimas.

Vertinant pačią sistemą jos sukūrimas nėra sudėtingas. Tokiais sistemai reikia sukurti valdymą, kuris yra paremtas proceso modeliu. Regulatoriaus derinti rankiniu režimu nereikia, tai yra padaroma automatiškai. O toks automatinis derinimas atliekamas kiekviena kartą nustatant kitą proceso modelį. Įrodyta, kad netiesioginis adaptyvusis valdymas duoda puikių rezultatų praktikoje, tačiau adaptyvios sistemos analizė yra gana sudėtingas procesas dėl valdiklio derinimo ir parametrų įvertinimo [1], [5].



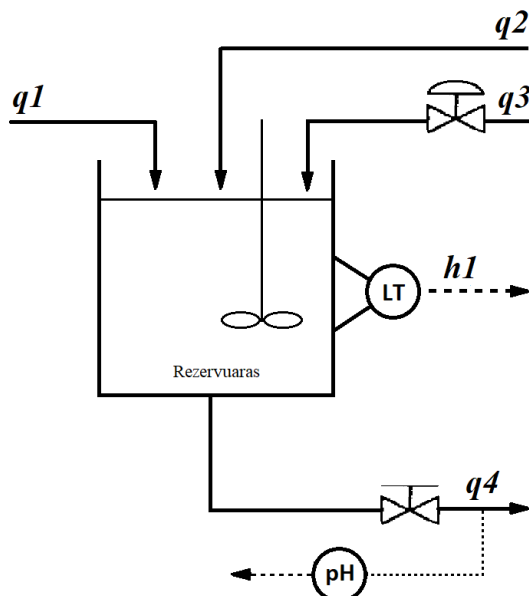
10 pav. Netiesioginis adaptyvusis savaime susireguliuojantis valdymas

1.4.3. Tiesioginis adaptyvusis valdymas

Tiesioginis adaptyvusis valdymas– Tai gana panašus valdymo būdas į netiesioginį adaptyvų valdymą, tačiau šiuo atveju valdiklio parametrai yra nustatomi tiesiogiai identifikuojami remiantis turimais duomenimis (Proceso modelio identifikavimas prieš šį žingsnį nėra atliekamas) [1], [5].

2. Proceso matematinio modelio sudarymas

Kaip jau buvo minėta anksčiau, pH parametras yra labai svarbus daugelyje procesų, taip pat ir chemijos pramonėje ruošiant tam tikros pH vertės tirpalą– šiuo atveju natrio hidrokarbonatą, kurio pH turi būti palaikomas ties verte 7. Remiantis [4] straipsnyje pateiktomis diferencialinėmis lygtimis bus sudaromas matematinis modelis, kurio tikslas išlaikyti užduotą pH vertę. Sudarytos sistemos įvertinimui papildomai bus įvedinėjami trikdžiai ir nuostato pokyčiai. Vandens koncentracijos vertė bus varijuojama kritiniuose taškuose– nuo 6 iki 8 pH. Šiame skyriuje pateikiamos lygtys, konstantos, kintamieji ir kiti parametrai naudojami proceso modelio realizacijai, o šio proceso sistemos modelis pateikiamas 11 pav. [4].



11 pav. pH neutralizavimo sistema

2.1. Proceso dinamiką aprašančios diferencialinės lygtys

pH lygis talpoje priklauso nuo:

- rūgšties– q_1 ;
- silpnos bazės– q_2 ;
- stiprios bazės– q_3 ;
- rezervuaro ploto– A ;
- esamo reagento lygio rezervuare– h ;
- ištekėjimo eksponentės– n ;
- ištekėjimo vožtuvo padėties– C_v ;

Cheminiame reaktoriuje susidarančio tirpalo kiekis išreikštas priklausomybe nuo įtekančių šarmų ir rūgšties, ir ištekančio susidariusio tirpalo kiekių skirtumų [4].

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} * (q_1 + q_2 + q_3 - C_v * (h + z)^n) \quad (5)$$

Iš 5 lygties: A – cilindrinio rezervuaro dugno plotas;
 q_1 – paduodamas azoto rūgšties tirpalo srautas;
 q_2 – paduodamas silpno natrio šarmo tirpalo srautas;
 q_3 – paduodamas stipraus natrio šarmo tirpalo srautas, naudojamas pH valdymui;
 C_v – išeigos vožtuvo padėties koeficientas;
 h – cheminiame rezervuare esančio tirpalo lygis;

z – vertikalus atstumas tarp rezervuaro dugno ir ištekėjimo vožtuvo;
 n – išeigos vožtuvo eksponentė.

Ištekėjimo srauto vertė W_{a4} išreikšta diferencialine lygtimi, kuri atspindi visų tirpalų krūvių sumą kiekvienam paduodamam srautui pH neutralizavimo proceso metu [4].

$$\frac{d(W_{a4})}{dt} = \frac{1}{Ah} * ((W_{a1} - W_{a4}) * q_1 + (W_{a2} - W_{a4}) * q_2 + (W_{a3} - W_{a4}) * q_3) \quad (6)$$

Iš 6 lygties: W_{a1} – paduodamo azoto rūgšties tirpalo bendra krūvių suma;
 W_{a2} – paduodamo silpno natrio šarmo tirpalo bendra krūvių suma;
 W_{a3} – paduodamo stipraus natrio šarmo tirpalo bendra krūvių suma;
 W_{a4} – bendras išeigos tirpalas, kuris nurodo ištekančio tirpalo bendrą krūvių sumą.

Ištekėjimo srauto vertė W_{b4} pateikta diferencialinės lygties forma nurodo tirpale esančią CO_3^{2-} jonų koncentraciją [4]:

$$\frac{d(W_{b4})}{dt} = \frac{1}{Ah} * ((W_{b1} - W_{b4}) * q_1 + (W_{b2} - W_{b4}) * q_2 + (W_{b3} - W_{b4}) * q_3) \quad (7)$$

Iš 7 lygties: W_{b1} – paduodamo azoto rūgšties tirpalo bendra CO_3^{2-} jonų koncentracija;
 W_{b2} – paduodamo silpno natrio šarmo tirpalo bendra CO_3^{2-} jonų koncentracija;
 W_{b3} – paduodamo stipraus natrio šarmo tirpalo bendra CO_3^{2-} jonų koncentracija;
 W_{b4} – bendras išeigos tirpalas, kuris nurodo ištekančio tirpalo bendrą CO_3^{2-} jonų koncentraciją.

Bendras ištekančio vandenilio koncentracijos kiekis apskaičiuojamas naudojant 8 lygtį. Šioje lygtyje įvertinami W_{a4} ir W_{b4} kintamieji, kurie nurodo ištekančio tirpalo krūvių sumą ir bendrą CO_3^{2-} jonų koncentraciją. Šios lygties išraiškai apskaičiuoti bus naudojamas *Niutono* metodas, kuris buvo paminėtas darbo pradžioje [4].

$$W_{b4} \frac{\frac{K_{a1}}{[H^+]} + \frac{2 * K_{a1} * K_{a2}}{[H^+]^2}}{1 + \frac{K_{a1}}{[H^+]} + \frac{K_{a1} * K_{a2}}{[H^+]^2}} + W_{a4} + \frac{K_{\omega}}{[H^+]} - [H^+] = 0 \quad (8)$$

Iš 8 lygties: $K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = 4,47 * 10^{-7}$, produktų koncentracijų pusiausvyros lygtis, kuri nurodo balanso konstantą cheminės reakcijos metu;

$K_{a2} = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} = 5,62 * 10^{-11}$, produktų koncentracijų pusiausvyros lygtis, kuri nurodo balanso konstantą cheminės reakcijos metu;

$K_{\omega} = [H^+][OH^-] = 10^{-14}$, produktų koncentracijų pusiausvyros lygtis, kuri nurodo balanso konstantą cheminės reakcijos metu;

$[H^+]$ – Vandenilio koncentracijos vertė, pH vertė yra neigiamas $[H^+]$ logaritmas, pateikta lygtyje 1.

2 lentelė. Proceso konstantos ir kintamieji [4]

Kintamasis:	Vertė:
Pradinės vertės:	
W_{a1} – [HNO ₃] tirpalo bendra krūvių suma	$3 \cdot 10^{-3} M$
W_{a2} – [NaHCO ₃] tirpalo bendra krūvių suma	$-3 \cdot 10^{-2} M$
W_{a3} – [NaOH] tirpalo bendra krūvių suma	$-3,05 \cdot 10^{-3} M$
W_{b1} – [HNO ₃] tirpale esančio CO ₃ ²⁻ jonų koncentracija	$0 M$
W_{b2} – [NaHCO ₃] tirpale esančio CO ₃ ²⁻ jonų koncentracija	$3 \cdot 10^{-2} M$
W_{b3} – [NaOH] tirpale esančio CO ₃ ²⁻ jonų koncentracija	$5 \cdot 10^{-5} M$
q_1 – rūgšties srautas	$16,6 \text{ ml/s}$
q_2 – silpnos bazės srautas	$0,55 \text{ ml/s}$
q_3 – stiprios bazės srautas	$15,6 \text{ ml/s}$
pH – ištekiančio reagento pH	$7,0$
$W_{a4} = [H^+] - [OH^-] - [HCO_3^-] - 2[CO_3^{2-}]$, reakcijos metu susidariusi krūvių suma	$-4,32 \cdot 10^{-4} M$
$W_{b4} = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$, reakcijos metu susidariusi CO ₃ ²⁻ jonų koncentracija	$5,28 \cdot 10^{-4} M$
Konstantos:	
h – rezervuaro aukštis	$0,14 \text{ m}$
θ – grįžtamojo ryšio vėlinimas	$0,001 \text{ h}$
n – ištekėjimo q_4 vožtuvo eksponentė	$0,5$
A – rezervuaro dugno plotas	$0,000207 \text{ m}^2$
C_v – Išeigos vožtuvo padėties koeficientas	$8,75$
z – vertikalus atstumas tarp rezervuaro dugno ir ištekėjimo vožtuvo;	$0,115 \text{ m}$
$K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$
$K_{a2} = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]}$	$5,62 \cdot 10^{-11}$
$K_w = [H^+][OH^-]$	10^{-14}

2.2. pH vertės išvedimas naudojant Niutono (angl. Newton) metodą

pH lygis yra skaičiuojamas tiesiogiai iš vandenilio koncentracijos. Ši priklausomybė aprašyta 9 lygtyje. Tačiau norint apskaičiuoti esamą vandenilio koncentracijos vertę reikia naudoti vieną iš skaitinių metodų, nes toliau pateiktos 10 formulės tiesiogiai išspręsti negalima. Taigi, vienas iš variantų yra jau anksčiau minėtas Niutono (angl. Newton) metodas, kuris ir bus apžvelgiamas šioje dalyje [15], [16], [17].

Niutono (angl. Newton) metodas yra gana plačiai naudojamas skaitinis algoritmas ieškant funkcijos tikrosios vertės. Šio metodo veikimas yra pagrįstas iteracijomis, kai kiekvienos iteracijos metu yra gaunama vis artimesnė vertė tikrajai funkcijos kintamojo vertei. Šio metodo taikymas yra gana plačiai naudojamas inžinerijoje, fizikoje, finansuose ir įvairiuose IT srityse, tai yra svarbus įrankis sprendžiant plataus spektro problemas [15], [16].

Metodo taikymas yra pradedamas nuo pirmojo skaičiaus spėjimo, kuris bus naudojamas kaip pradinė funkcijos sąlyga nuo kurios bus tęsiama artimiausios vertės paieška tikrajai vertei. Šiame darbe ieškant esamos vandenilio koncentracijos vertės pirmasis spėjamas skaičius yra tik minimaliai nutolęs nuo tikrosios vertės, nes procesas yra pradedamas pasirinkus pradines parametrų vertes ir sąlygas. Šiame darbe naudojama formulė su išreikšta vandenilio koncentracijos verte pateikta toliau numeriu 9. Iš šios formulės yra išvedama galutinė išraiška, kuri bus naudojama esamo pH lygio skaičiavimui [15].

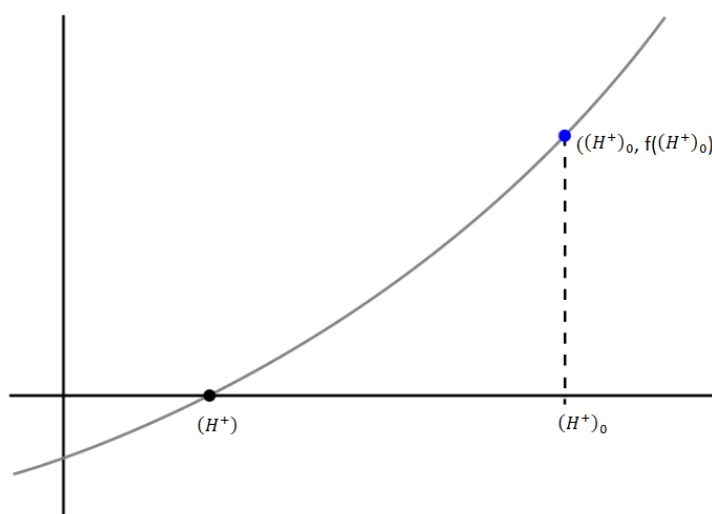
$$f(H^+) = Wb \frac{\frac{Ka1}{[H^+]} + \frac{2 * Ka1 * Ka2}{[H^+]^2}}{1 + \frac{Ka1}{[H^+]} + \frac{Ka1 * Ka2}{[H^+]^2}} + Wa + \frac{K\omega}{[H^+]} - [H^+] \quad (9)$$

$$f'(H^+) = \frac{K\omega}{[H^+]^2} - \frac{Ka1([H^+]^2 + 4 * [H^+] * Ka2 + Ka1 + Ka2) * Wb}{([H^+]([H^+] + Ka1) + Ka1 * Ka2)^2} \quad (10)$$

$$(H^+) = \frac{f((H^+)_{0}) - (H^+)_{0} * f'((H^+)_{0})}{1 - f'((H^+)_{0})} \quad (11)$$

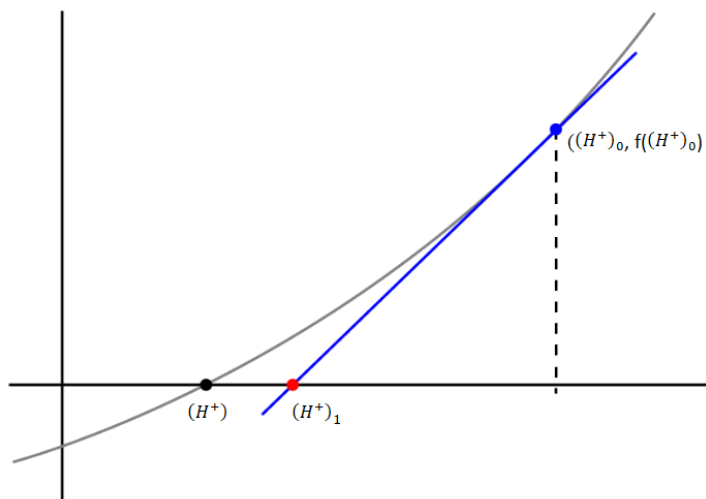
Iš 10 lygties: H^+ – perskaičiuota vandenilio koncentracija (mol/l);
 $f((H^+)_{0})$ – numeriu 9 pateiktos formulės funkcijos vertė įsistačius pradinę vandenilio koncentracijos vertę;
 $f'((H^+)_{0})$ – numeriu 9 pateiktos formulės išvestinės vertė įsistačius pradinę vandenilio koncentracijos vertę;
 $(H^+)_{0}$ – pradinė vandenilio koncentracijos vertė (10^{-7} mol/l).

Šio metodo eiga kaip jau buvo minėta yra pradedama nuo pirmos vertės $(H^+)_{0}$ spėjimo.



12 pav. Parenkamo pradinio taško $[H^+]$ vertė [15]

Sekančio žingsnio metu, atliekant tikrosios vandenilio koncentracijos paieškas, spėjama $[H^+]$ vertė yra įstatoma į funkciją ir išvedama funkcijos išvestinė, taip yra atliekama linijinė aproksimacija ir gaunama liestinė kertanti x ašį ir pirmosios iteracijos metu pasirinktą vertę. Gauta naujoji vertė $(H^+)_1$ yra naudojama kaip sekantis spėjimo taškas, kuris yra arčiau tikrosios vertės, šios dalies grafinė schema pateikiama 13 pav. Suskaičiuota vertė yra priimama kaip naujas spėjimas. Skaičiavimas pradedamas iš naujo ir yra kartojamas tol kol yra įvykdomas užduotų iteracijų kiekis arba kai šią vertę įsistačius į 9 lygtį yra gaunamas nulis [15].



13 pav. Liestinės brėžimas į funkciją įstačius pradinę $[H^+]$ vertę [15]

Taigi, naudojant *Niutono* (angl. *Newton*) metodą pavyko apskaičiuoti tikrąją vandenilio koncentracijos $[H^+]$ vertę priklausomai nuo W_{a4} ir W_{b4} kintamųjų. Šio metodo taikymas yra gana paprastas ir tikslus, o konvergavimas dažniausiai vyksta greičiau lyginant su kitais metodais, tačiau tam taip pat gali turėti įtakos ir pirmosios vertės spėjimas, kuris šiame darbe iškart buvo pasirinktas gana tikslus. Metodo skaičiavimams naudotas *MATLAB Simulink* programinis paketas, optimalus pasirinktas iteracijų skaičius yra 35. Naudojant mažiau iteracijų vandenilio koncentracijos vertė ne visada spėdavo pasiekti tikrąją vertę, nes drastiškai pakitusiam pH lygiui trumpame laiko tarpe nepakakdavo iteracijų kiekio, kuriuo buvo artėjama realios vertės link. Problema buvo pastebima grafiškai, kai pradėdant stipriai keistis išėigos pH vertei ši po tam tikro laiko pasiekdavo minimalias arba maksimalias leidžiamas ribas. Įvesti žymiai daugiau iteracijų, kurių kiekis užtikrintų sklandų esamos pH vertės skaičiavimą taip pat nėra teisinga, nes didinamas iteracijų skaičius lėtindavo proceso ciklo laiką. Bandymų metu buvo nustatyta, kad minimalus iteracijų skaičius, kuriuo išvengiama skaičiavimo problemų yra 35 [15], [16], [17].

„*Matlab Fcn – Newton’s method*“ funkcinio bloko langas su sudarytu kodu metodo taikymui:

```
function pH = fcn (Wa,Wb)
Ka1 = 4.47*10^-7; % Reakcijos 1 metu gauta pusiausvyros konstanta 1 [Ka1]
Ka2 = 5.62*10^-11; % Reakcijos 2 metu gauta pusiausvyros konstanta 2 [Ka2]
Kw = 1*10^-14; % Reakcijos 3 metu gauta pusiausvyros konstanta 3 [Kw]

%Pradinės reakcijos koncentracijų vertės [Wa, Wb]
%Wa = -4.32*10^-4;
%Wb = 5.28*10^-4;

%Pradinė vandenilio koncentracija / pirmasis spėjimas
Hp = 0.0000001;
%Tikrosios vertės paieškų iteracijų kiekis
for i = 1:35
% H Koncentracijos priklausomybė nuo Wa ir Wb verčių
```

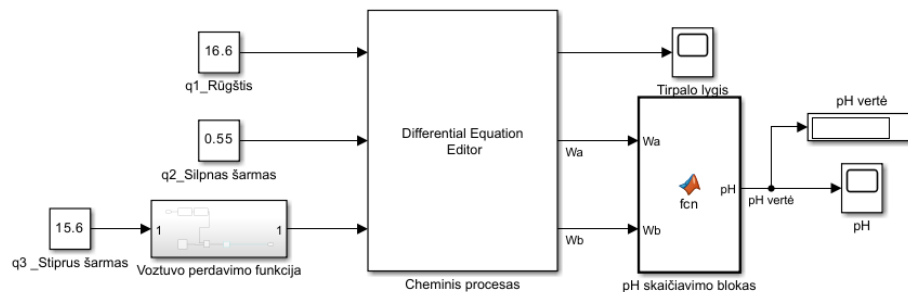
```

funkcija = (Wb*(Ka1/Hp+(2*Ka1*Ka2)/Hp^2)/(1+Ka1/Hp+(Ka1*Ka2)/Hp^2)+Wa+(Kw/Hp));
% Išvestinė, naudojama Niutono metodo paieškos skaičiavimui
isvestine = -(Kw/Hp^2)-(Ka1*(Hp^2+4*Hp*Ka2+Ka1*Ka2)*Wb)/(Hp*(Hp+Ka1)+Ka1*Ka2)^2;
% Perskaičiuojama vandenilio koncentracijos vertė Niutono metodu
Hp = (funkcija - Hp* isvestine)/(1-isvestine);
% Apibrėžiama vandenilio koncentracijos kitimo riba
if Hp < 0.0000001e-10
    Hp = 0.000001e-10;
end
end
% Skaičiuojamas pH dydis priklausomai nuo vandenilio koncentracijos
Hp2 = log10((Hp));
pH = -Hp2;

```

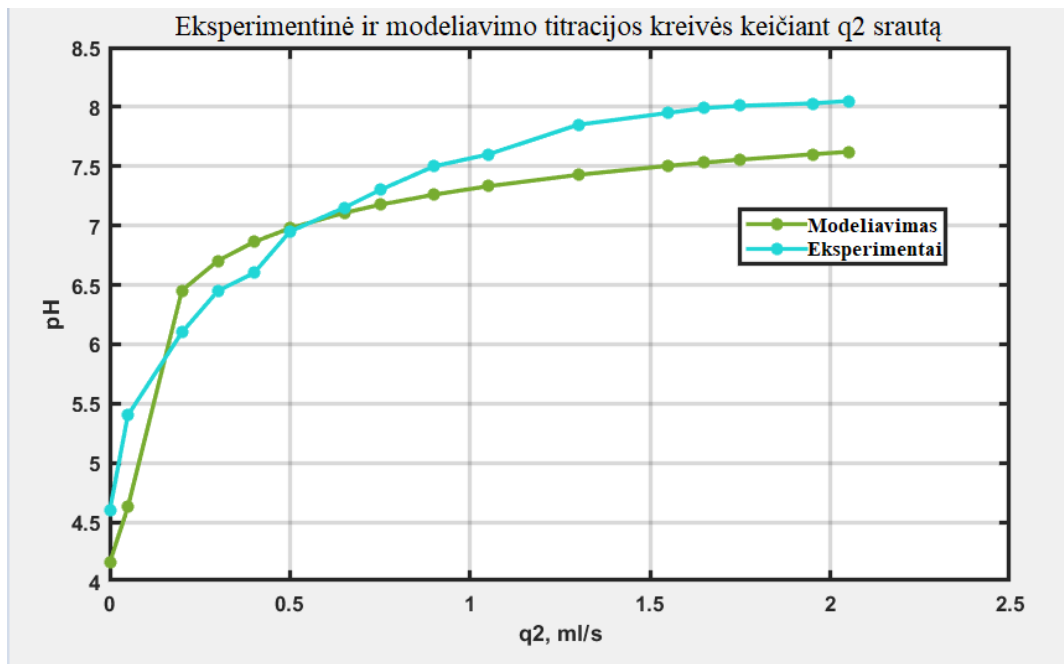
2.3. Proceso matematinio modelio be valdymo realizavimas

Realizavus skaitinį *Niutono* (angl. *Newton*) metodą sudaromas imitacinis proceso modelis be reguliavimo, kuris pateikiamas 14 pav. Šiuo modeliu yra įvertinamas sudarytos sistemos adekvatumas lyginant išeigos pH vertes gautas eksperimentiškai ir naudojant imitacinį modelį, kai yra keičiami įtekančių tirpalų srautai [4].

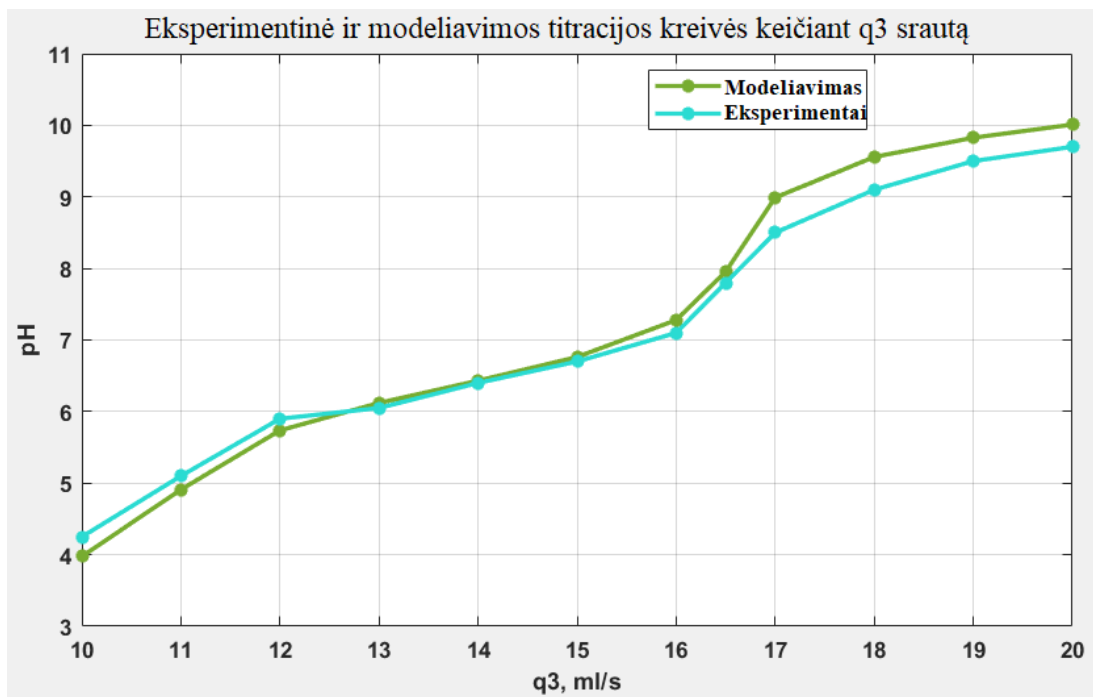


14 pav. Cheminio reaktoriaus imitacinis modelis sudarytas *Matlab Simulink* aplinkoje

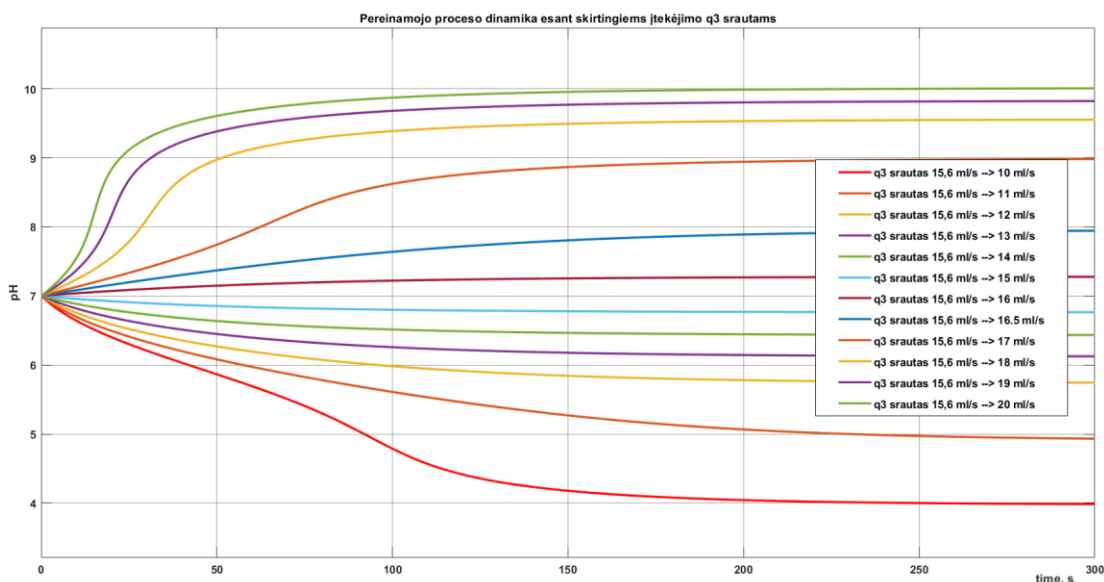
pH lygio palaikymo sistema yra sudaryta iš 3 paduodamų reagentų, kurie įteka į rezervuarą. Šie reagentai (q_1 , q_2 , q_3) 13 pav. pavaizduoti modelyje nenaudojant valdymo. Gauti pereinamojo proceso grafikai iš kurių galima daryti išvadas apie proceso kintamųjų įtakas. Pateiktuose 15 pav. ir 16 pav. atvaizduojamos proceso titracijos kreivės atskirai kintant q_2 ir q_3 šarmų srautams. Palyginti eksperimentiniai duomenys pateikti straipsnyje [4] ir imitacinio modelio išeigoje gauti duomenys kintant įtekančioms srautams. Iš 15 pav. matyti, kad keičiant įtekančio silpno šarmo srautą pH kinta netiesiškai, didžiausia įtaką pH vertei pastebima kai šis srautas svyruoja nuo 0 ml/s iki 0,2 ml/s, o tuo tarpu pH šiuose darbo taškuose kinta nuo 4 pH iki 6,5 pH vertės. Atliekant stipraus šarmo įtekėjimo pokytį, kuris atvaizduojamas 16 pav. taip pat yra pastebima q_3 ir pH netiesiška priklausomybė. Intervalas, kuriame pH lygis yra labiausiai įtakojamas stipraus šarmo svyruoja kai q_3 kinta nuo 16 ml/s iki 18 ml/s. O pH šiuose režimuose svyruoja nuo 7 iki 9 pH matavimo vienetų. 17 pav. pavaizduotas proceso dinamiškumas esant skirtingiems q_3 įtekėjimo srautams, pastebima, kad pH vertės nusistovėjimo laikas yra neproporcingas įtekančio srauto skirtumui. Taigi, minėtuose paveikslėliuose įvertinami eksperimentiniai ir simuliaciniai bandymai, kurie įrodo, kad imitacinį modelį galima naudoti reguliavimo sistemos tyrimui [4], [26], [27].



15 pav. Eksperimentinė ir imitaciniame modelyje gautos titracijos kreivės keičiant įtekančio q_2 silpno šarmo srautą



16 pav. Eksperimentinė ir imitaciniame modelyje gautos titracijos kreivės keičiant įtekančio q_3 stipraus šarmo srautą



17 pav. Pereinamojo proceso dinamika esant skirtingiems q_3 įtekėjimo srautams

2.4. Paprastojo PI reguliatoriaus sudarymas

Šiame skyriuje yra įvertinami skirtingi PI reguliatoriaus derinimo metodai, tolimesnėje eigoje pasirenkamas vienas iš jų, kuris ir bus naudojamos sudarytoje sistemoje. PI reguliatoriaus pasirinkimą lėmė esamos sistemos dinamika. PI valdiklis pasižymi stabilumu lyginant jį su PID reguliatoriumi, kuriame papildomai naudojamas diferencijavimo laikas. Ši dedamoji gali padidinti sistemoje esančius triukšmus, sukelti nestabilumus ir papildomus svyravimus. PI reguliatorius naudoja integralinę laiko dedamąją, kuri tinkamai suderinta eliminuoja stabilios sistemos klaidas, o tai padaro šį reguliatorių mažiau jautrų triukšmui. Toliau yra parenkamas reguliatoriaus derinimo metodas.

Cohen–Coon derinimo metodas

Cohen–Coon derinimo metodas pradedamas nuo atvirojo kontūro perdavimo funkcijos nuostato vertės pakeitimo, šiuo atveju reguliatorius nėra naudojamas. Atvirojo kontūro sistemos reakcijos kreivei yra brėžiama liestinė, kurios pagalba skaičiuojami reguliatoriaus parametrai. Toliau pateikiama pereinamojo proceso metu gautos parametrų vertės:

$$T_{pr} = 43s; \tau_{pr} = 3s; \Delta output = -2,39pH; \Delta input = -2ml/s.$$

$$K_{pr} = \frac{\Delta output}{\Delta input} = \frac{-2,39}{-2} = 1,195;$$

Skaičiuojami PI reguliatoriaus parametrai, formulės pateiktos 1 lentelėje.

$$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}\tau_{pr}} \left(0,91 + \frac{\tau_{pr}}{12T_{pr}}\right) = \frac{43}{1,195 \cdot 3} \left(0,91 + \frac{3}{12 \cdot 43}\right) = 10,982 \quad (12)$$

$$T_i = \frac{30 + 3\tau_{pr}/T_{pr}}{9 + 20\tau_{pr}/T_{pr}} \tau_{pr} = \frac{30 + 3 \cdot 3/43}{9 + 20 \cdot 3/43} \cdot 3 = 8,718s \quad (13)$$

Iš 12 ir 13 formulių skaičiuojami galutiniai PI reguliatoriaus parametrai, kurie ir bus naudojami modelyje esančiame reguliatoriuje ir derinimo metodų pasirinkimo etape [3], [5], [31].

Kappa-Tau derinimo metodas

Kappa-Tau derinimui pagrįstam šuoline reakcija naudojamos 3 pagrindinės dedamosios, tai statinis stiprinimas (K_{pr}), atstojamasis vėlavimas (T_{pr}) ir atstojamoji laiko pastovioji (τ_{pr}). Iš aukščiau pateiktų dydžių papildomai išvedamas parametras $\alpha = K_{pr}(\tau_{pr}/T_{pr})$. Normuotas vėlavimas apibrėžiamas naudojant formulę:

$$\tau = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} \quad (14)$$

Grafiškai apskaičiuotoms vertėms ir išvestiems dydžiams pagal ankščiau minėtas formules yra naudojamos PI reguliatoriaus dedamųjų skaičiavimo lygtys:

$$\begin{aligned} K_{pr} &= \frac{0,29}{\alpha} * \exp * (-2,7 * \tau + 3,7 * \tau^2) = \\ &= \frac{0,29}{0,834} * \exp * (-2,7 * 0,0652 + 3,7 * 0,0652^2) = 2,9630 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{0,79}{\alpha} * 20 * \exp(-1,4 * \tau + 2,4 * \tau^2) = \\ &= \frac{0,79}{0,834} * 20 * \exp(-1,4 * 0,0652 + 2,4 * 0,0652^2) = 17,4749 \end{aligned} \quad (16)$$

Remiantis šiomis formulėmis apskaičiuojami reguliatoriaus pereinamojo proceso parametrai, kuriais bus atliekamas proceso valdymas ir kokybinių parametų įvertinimas lyginant su kitais derinimo metodais [3], [5], [30].

Ziglerio ir Nikolso (angl. Ziegler-Nichols) derinimo metodas

Šis metodas dar kitaip vadinamas jautrumo metodu pagrįstas pereinamojo proceso stiprinimo koeficiento P didinimu tol, kol gaunami neslopstantys švytavimai, kurie ir nusako kada esama stiprinimo vertė yra lygi K_r vertei. Toliau grafiškai yra nustatomas laikas tarp svyravimų, kurio dydį nusako parametras T . Pateiktoje 3 lentelėje pagal PI reguliatoriui pateiktas formules skaičiuojamos reguliatoriaus dedamosios. Reguliatoriaus derinimas atliekamas esant pH vertei 7, o kokybiniai parametrai įvertinami šiai vertei įvedant nuostato pokytį +0,2 [5], [28], [32].

3 lentelė. Reguliatoriaus derinimo formulės.

Reguliavimo dėsnis	Reguliatoriaus derinimo parametrai		
	k_r	T_i	T_d
P	$k_r = 0,5 * k_{r \text{ maks}}$	—	—
PI	$k_r = 0,45 * k_{r \text{ maks}}$	$T_i = 0,833 * T$	—
PID	$k_r = 0,6 * k_{r \text{ maks}}$	$T_i = 0,5 * T$	$T_d = 0,125 * T$

Atlikus reguliatoriaus derinimą buvo gauti neslopstantys švytavimai, kai PI reguliatoriaus P dedamosios vertė $K_r=17,8$. Svyravimų periodas apskaičiuotas grafiškai $T = 8,17$ s. Toliau pagal pateiktos 3 lentelės formules apskaičiuojami PI reguliatoriaus parametrai:

$$K_r = 0,45 * K_r = 0,45 * 17,8 = 8,01 \quad (17)$$

$$T_i = 0,833 * T = 0,833 * 8,17 = 6,806s \quad (18)$$

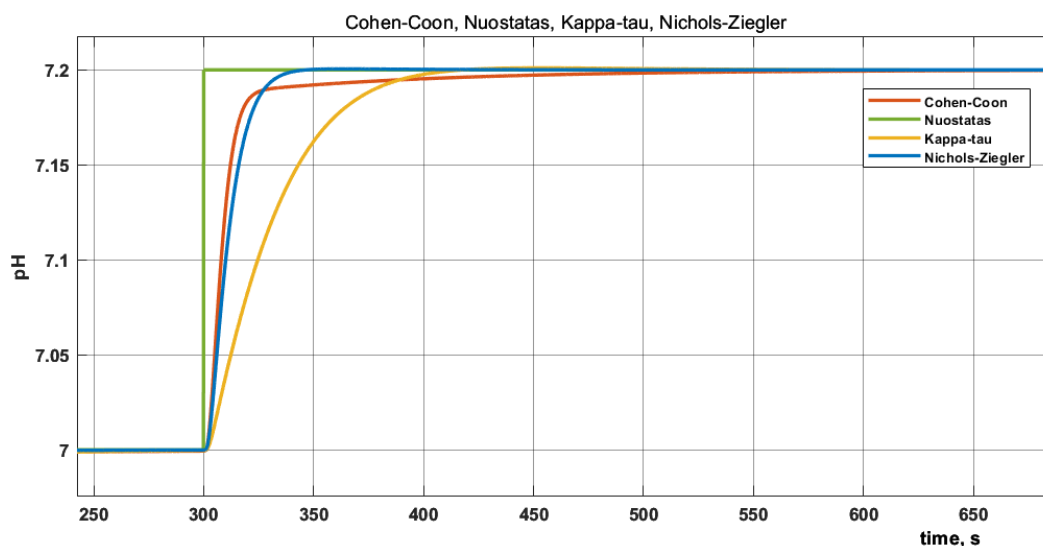
Regulatoriaus derinimo metodo pasirinkimas

Apibendrinant, atlikus PI regulatoriaus derinimą *Kappa-Tau*, Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) ir *Cohen-Coon* metodais buvo gautos pereinamojo proceso laiko dedamosios, kurios pateiktos 4 lentelėje. Visi derinimo metodai buvo atliekami darbo taške, kai pH vertė yra 7, o esant poreikiui įvedamas nuostato pokytis padidinant nuostato vertę iki 7,2 pH.

4 lentelė. Skirtingų derinimo metodų taikymo metu gauti PI regulatoriaus parametrai

Reguliavimo metodas	PI regulatoriaus parametrai		Apskaičiuota suminė integralinė paklaidos vertė (IAE)	t_r – reguliavimo trukmė, s
	K_r	T_i		
<i>Cohen-Coon</i>	$K_r = 10,982$	$T_i = 8,1780$ s	2,903	255,530 s
<i>Kappa-Tau</i>	$K_r = 2,963$	$T_i = 17,4749$ s	6,247	123,733 s
<i>Nichols-Ziegler</i>	$K_r = 8,010$	$T_i = 6,8060$ s	2,424	51,382 s

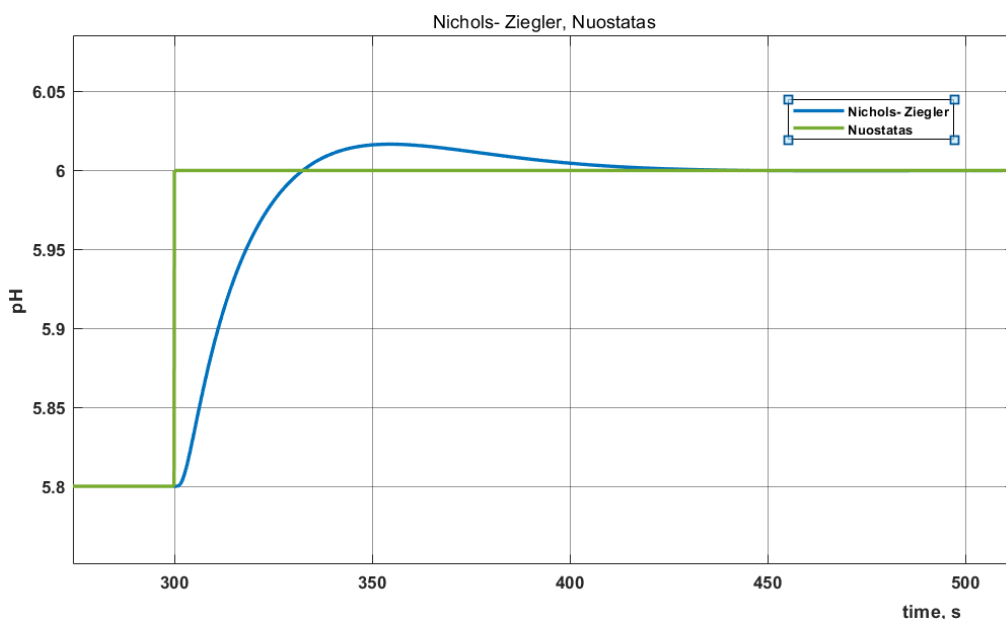
Toliau pateikiamas 17 pav. kuriame matyti pereinamojo proceso grafikai atlikus PI regulatoriaus derinimo metodą 3 skirtingais būdais.



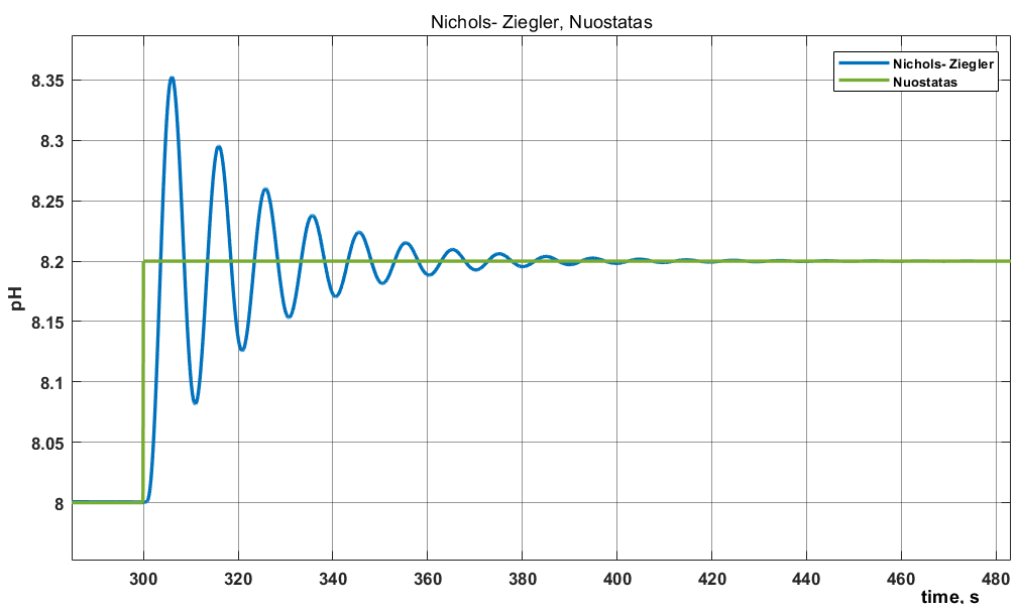
18 pav. PI regulatoriaus pereinamojo proceso valdymas suderinus reguliatorių *Cohen-Coon*, *Kappa-Tau*, Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodais esant nuostatui 7 pH, kuriam įvedamas nuostato pokytis +0,2 pH

Taigi, atlikus PI regulatoriaus derinimą trimis skirtingais derinimo metodais buvo gautas pereinamojo proceso grafikas pateiktas 18 pav. Šiame grafike pateikiamas regulatoriaus atsakas atlikus derinimą *Cohen-Coon*, *Kappa-Tau* ir Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodais kai didinama nuostato vertė. Geriausi kokybiniai parametrai gauti atlikus derinimą Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) skaičiavimo metodu, šiuo metodu suderintas reguliatorius procesą užduotame darbo taške valdo be perreguliuavimo, pasiekia užduotą vertę ir nusistovi greičiausiai lyginant jį su kitais PI regulatoriais, kurių parametru skaičiavimams buvo naudojami *Cohen-Coon* ir *Kappa-Tau* metodai. Taip pat pasirinkto darbe naudoti regulatoriaus derinimo metodo suminė integralinė paklaidos vertė yra mažiausia, tai matyti 4 lentelėje. Šis dydis nurodo reguliuojamos išėigos mažiausia nuokrypį nuostato atžvilgiu. Tolimesniuose regulatoriaus derinimo punktuose bus naudojamas Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) parametru skaičiavimo metodas [28], [29].

Žemiau pateikiami pereinamojo proceso grafikai esant ribinėms pH nuostato vertėms, kai įvedamas +0,2 pH vertės šuolis nusistovėjusiai pH vertei. Šiais bandymais atliekamas Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) paprastojo PI regulatoriaus įvertinimas kai reguliatorius su identiškais reguliavimo parametrais dirba skirtinguose darbo taškuose.



19 pav. Pereinamojo proceso grafikas naudojant 4 lentelėje pateiktus Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodu apskaičiuotus reguliatoriaus parametrus keičiant nuostato vertę nuo 5,8 pH į 6 pH.



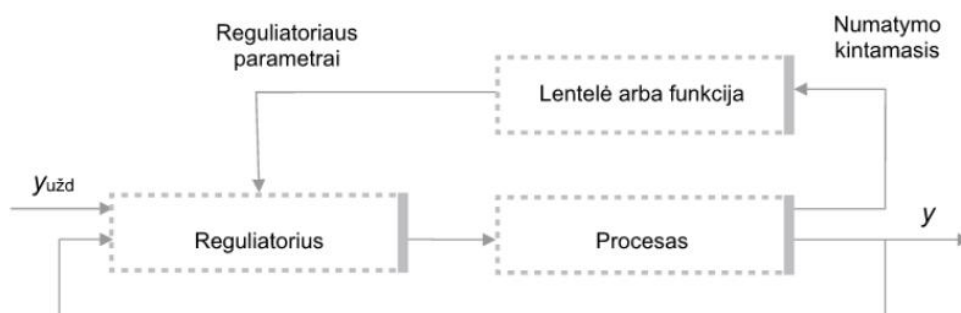
20 pav. Pereinamojo proceso grafikas naudojant 4 lentelėje pateiktus Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodu apskaičiuotus reguliatoriaus parametrus keičiant nuostato vertę nuo 8 pH į 8,2 pH.

Pateiktuose 18 pav. ir 19 pav. pereinamojo proceso grafikuose, kai paprastasis PI reguliatorius dirba ribiniuose darbo taškuose matyti, kad naudojant reguliatorių su nekintančiais stiprinimo ir integravimo laiko parametrais procesas nėra valdomas tinkamai. Šiuo atveju yra gaunami švytavimai, stiprus perreguliavimas, procesas užtrunka ilgą laiką tarpą kol nusistovi arba išvis nenusistovi užduotame darbo taške. Dėl netiesiškai kintančios pH vertės šiame darbe bus naudojamas stiprinimo numatymo adaptyvusis valdymas, o reguliatoriaus derinimas pasirinktuose darbo taškuose bus

atliekamas remiantis Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) skaičiavimo metodu, kadangi šiuo metodu grafiškai ir matematiškai nustatyti pereinamojo proceso parametrai pasiekė aukščiausią reguliavimo kokybę lyginant su kitais regulatoriaus derinimo metodais [28], [29].

2.5. Adaptyviojo PI regulatoriaus sudarymas

21 pav. pateikta adaptyviojo regulatoriaus struktūra, kuri bus naudojama atliekant pH reguliavimą keičiant PI regulatoriaus parametrus priklausomai nuo grįžtamojo ryšio vertės. Regulatoriaus derinimas atliekamas pH ribose nuo 6 iki 8 matavimo vienetų. Kiekviename taške kas 0.2 žingsnį yra suderinamas regulatorius naudojant Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) derinimo metodą. Šio derinimo metodo pagalba, kai PI regulatoriaus I dedamoji yra eliminuojama, o P dedamoji didinama tol kol gaunami tolygūs pereinamojo proceso švytavimai gaunamos vertės reikalingos regulatoriaus parametru apskaičiavimui. Gauti parametrai yra perskaičiuojami į regulatoriaus P ir I dedamąsias, kurie bus realizuoti reguliatoriuje. Šių parametru skaičiavimui žemiau pateikta 3 lentelė. Toks derinimo metodas yra atliekamas kiekviename žingsnyje, o perskaičiuotos parametru vertės atvaizduotos 5 lentelėje [4], [24], [18].



21 pav. Stiprinimo numatymo valdymo sistemos struktūra [7]

Žemiau pateiktoje lentelėje pateiktos regulatoriaus derinimo formulės taikant jautrumo metodą, kai valdomas statinis objektas.

5 lentelė. PI regulatoriaus parametrai gauti naudojant Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodą

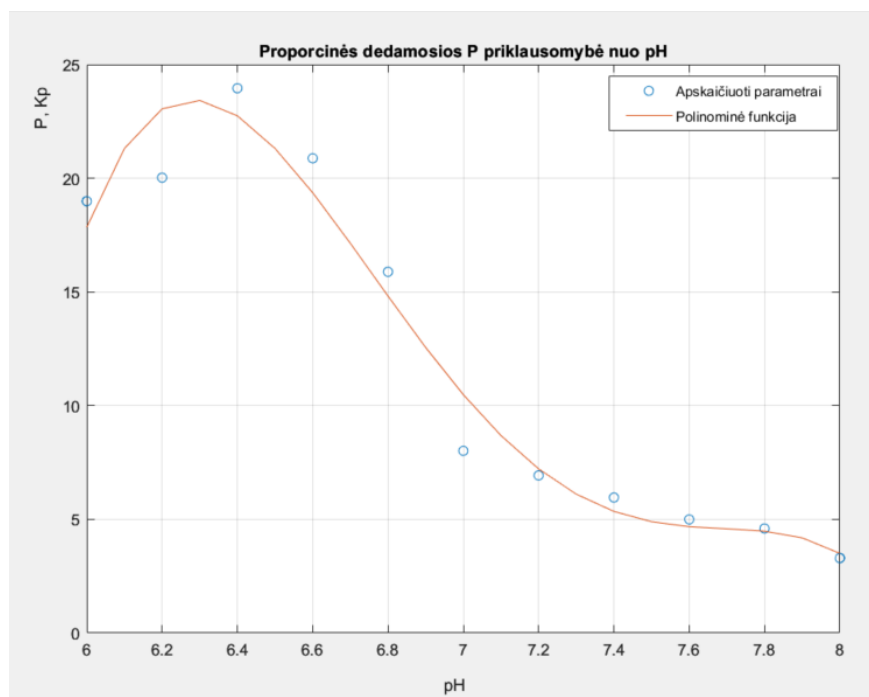
pH	Stiprinimo parametras k_r	Svyravimų periodas T	Perskaičiuotas P parametras	Perskaičiuotas I parametras
8,0	7,32	20,01	3,29	0,060
7,8	10,22	14,21	4,60	0,085
7,6	11,11	13,19	4,99	0,091
7,4	13,30	11,01	5,99	0,109
7,2	15,40	9,57	6,93	0,125
7,0	17,80	8,17	8,01	0,147
6,8	35,30	4,07	15,89	0,295
6,6	46,40	3,08	20,88	0,390
6,4	53,24	2,61	23,96	0,460
6,2	44,50	3,01	20,03	0,398
6,0	42,20	3,03	18,99	0,396

Turint sudarytą regulatoriaus parametų lentelę galima apskaičiuoti polinomų funkcijas kiekvienam iš valdomų parametų, tai atliekama žemiau pavaizduotu Matlab kodo fragmentu [18].

„*Matlab* pakete aprašyta funkcija polinomų lygčių skaičiavimui:

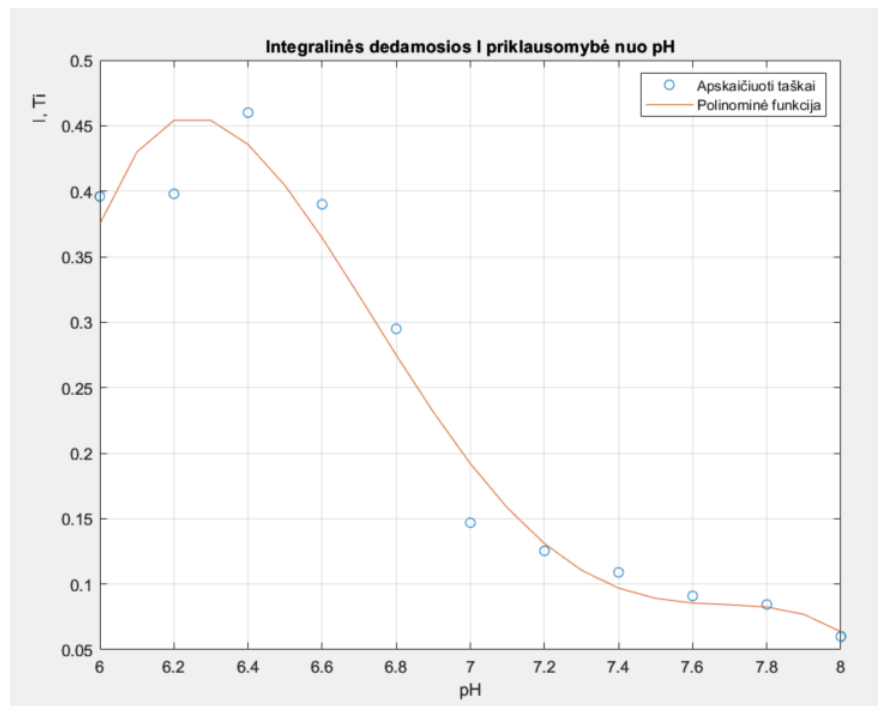
```
% P parametro gautos reikšmės pasitelkiant Nichols-Ziegler derinimo metodą
y = [18.99 20.025 23.958 20.88 15.885 8.01 6.93 5.958 4.995 4.599 3.294];
% I parametro gautos reikšmės pasitelkiant Nichols-Ziegler derinimo metodą
%y = [0.396 0.398 0.46 0.39 0.2949 0.1469 0.1254 0.109 0.091 0.08448 0.06];
%pH vertės nuo 6 iki 8 naudojant 0.2 žingsnį
x = [6 6.2 6.4 6.6 6.8 7 7.2 7.4 7.6 7.8 8];
%Polinominė funkcija lygties skaičiavimui
p = polyfit(x,y,4)
x2 = 6.:1:8; % Grafike pateikta x ašis
y2 = polyval(p,x2); %Grafike pateikta y ašis
plot(x,y,'o',x2,y2) %pH ir reguliatoriaus parametų priklausomybės grafikas
grid on
%Polinominės 4 eilės lygties išraiškos funkcijos atvaizdavimas
s = sprintf('y = (%.5f) x^4 + (%.5f) x^3 + (%.5f) x^2 + (%.5f) x + (%.5f)',p(1),p(2),p(3),p(4))
text(2,400,s)
```

Toliau yra atvaizduojamos PI regulatoriaus parametų priklausomybės nuo pH vertė. Pateikiamos apskaičiuotos regulatoriaus dedamųjų polinomų funkcijos, kurios bus naudojamos realizuojant adaptyvųjį PI reguliatorių. Žemiau pateiktuose 22 pav. ir 23 pav. grafikuose matomos apskaičiuotos regulatoriaus parametų vertės naudojant pasirinktą derinimo metodą. Taškų priklausomybei išreikšti aprašoma funkcija polinomų lygčių skaičiavimui pateikta MATLAB aplinkoje. Gautos funkcijos pateiktos 19 ir 20 numerių pažymėtose lygtyse [24].



22 pav. Proporcinės dedamosios P priklausomybės grafikas nuo pH vertės

$$P = -13,708 * x^4 + 396,159 * x^3 - 4275,138 * x^2 + 20405,155 * x - 36312,181 \quad (19)$$



23 pav. Integralinės dedamosios I priklausomybės grafikas nuo pH vertės

$$I = -0,255 * x^4 + 7,358 * x^3 - 79,207 * x^2 + 399,042 * x - 669,006 \quad (20)$$

„Matlab Fcn – Adaptyvumas“ funkcinio bloko langas realizavus reguliatoriaus parametrų adaptyvumą:

```
function [P, I] = fcn (x)
%P parametro polinominė funkcija
P = -13.708*x^4+396.159*x^3-4275.138*x^2+20405.155*x-36312.181;
%I parametro polinominė funkcija
I = -0.255*x^4+7.358*x^3-79.207*x^2+399.042*x-669.006;
```

3. Reguliavimo sistemų tyrimas

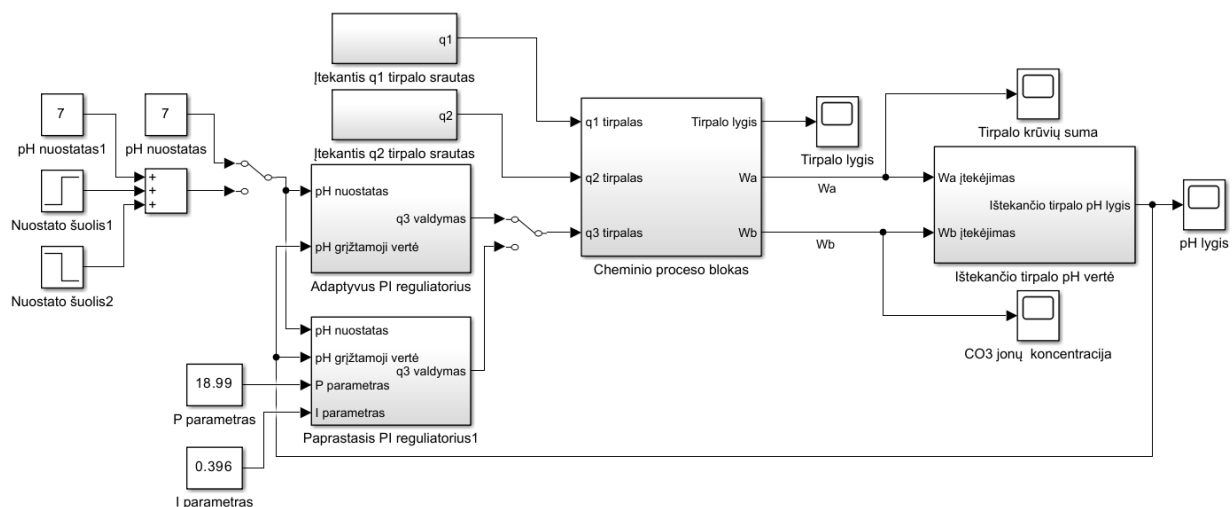
3.1. Matematinio modelio realizacija *Matlab Simulink* aplinkoje

Atliekant cheminio reaktoriaus pH valdymo matematinį modeliavimą *Matlab Simulink* aplinkoje pirmiausiai buvo priimti realūs tokios sistemos apribojimai:

- pH vertės matavimo paklaida priimama ± 0.02 tikslumu;
- Vožtuvuose tekančių skysčių laminariniai ir turbulentiniai trikdžiai nevertinami;
- Nereguliuojamų tirpalų siurblių perdavimo funkcijos nevertinamos;
- pH vertės palaikymas tiriamas ribose nuo 6 iki 8.

3.1.1. Sudaryto matematinio modelio proceso blokas

Toliau pateikiamas sudarytas matematinis cheminio proceso langas, kuris pavaizduotas 24 pav. Parinkta modelio diskretizavimo vertė lygi 0,01. Cheminio proceso valdymui yra naudojami 3 įėjimai, tai rūgšties tirpalas (q_1), silpno šarmo tirpalas (q_2) ir reguliuojamas stiprus šarmas (q_3). Šių įėjimų kitimo savybės aprašomos diferencialinėmis lygtimis. Priklausomai nuo minėtų įėjimo verčių yra skaičiuojamos susidarančio CO_3^{2-} tirpalo jonų koncentracijos ir bendros susidariusios išeigos krūvių sumos. Šių verčių esama vertė nusako ištekančiame tirpale esančių vandenilio jonų koncentraciją, kurios vertė skaičiuojama iš ankščiau minėtos (8) formulės taikant *Niutono (angl. Newton) metodą*.



24 pav. ARS modelis *Matlab Simulink* aplinkoje

3.1.2. Apibrėžiamos tyrimų ribos

Nuostato pokyčio įvertinimas bus atliekamas lyginant adaptyvųjį PI reguliatorių su paprastuoju PI reguliatoriumi, kai paprastojo reguliatoriaus parametrai yra konstantos 3 pasirinktuose taškuose. Paprastojo PI reguliatoriaus parametrai pasirinktuose taškuose naudojami iš 4 lentelės duomenų, žemiau pateikiami atliekami bandymai:

- $\text{pH} = 6$, reguliavimui įvertinti bus įvedamas impulsinis nuostato pokytis ± 0.2 ;
- $\text{pH} = 7$, reguliavimui įvertinti bus įvedamas impulsinis nuostato pokytis ± 0.2 ;

- pH = 8, reguliavimui įvertinti bus įvedamas impulsinis nuostato pokytis ± 0.2 .

Trikdžio įvedimo tyrimui šuoliškai bus keičiami q_1 ir q_2 įtekėjimo srautai pagal toliau pateiktos 6 lentelės trikdžio vertes.

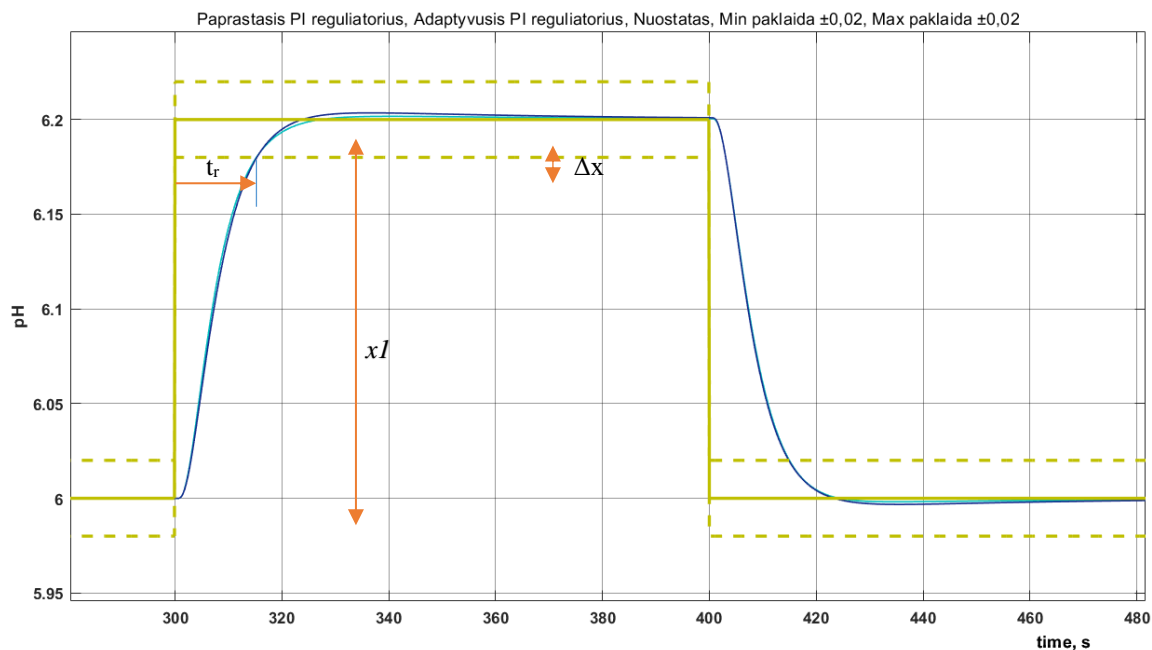
6 lentelė. Tyrimo metu įvedamų trikdžių vertės

Laikas, s	q2 (ml/s)	q1 (ml/s)
0	0,55	16,6
1800	-	16,1
2700	1,05	-
3600	-	17,1
5400	-	16,6
6300	0,20	-
9900	0,65	-

3.2. Tiriamos ARS reakcija į nuostato pokytį

Šioje dalyje bus atlikti bandymai sudarytų reguliatorių įvertinimui keičiant nuostatą šuoliškai. Paprastojo PI reguliatoriaus parametrai pasirenkami iš jau Ziglerio ir Nikolso (*angl. Ziegler-Nichols*) metodu suderintų parametų 5 lentelės. Pirmasis bandymas atliekamas paprastajam PI reguliatoriui naudojant parametų vertes, kurios buvo suderintos ties pH verte 6. Su šiais parametrais bus įvertinami ir palyginami reguliatorių valdymo kokybiniai parametrai esant 3 skirtinguose taškuose, kai pH=6, pH= 7 ir pH= 8. Antrasis bandymas, tokio paties pobūdžio kokybinių parametų įvertinimas, tačiau šiuo atveju paprastojo PI reguliatoriaus parametrai pakeičiami į tuos, kurie buvo suderinti esant pH vertei 7. Bandymai kaip ir pirmajame punkte atliekami 3 skirtinguose darbo taškuose. Trečiojo bandymo metu visos sąlygos ir bandymai kokybinių parametų nustatymui išlieka identiški, išskyrus paprastojo PI reguliatoriaus parametų vertes, kurios iš minėtos lentelės keičiamos į suderintas vertes esant pH vertei 8. Visuose 3 bandymuose bus naudojamas $\pm 0,2$ impulsinis pH pokytis.

pH nuostatui 6, 7, 8 įvedamas pokytis $\pm 0,2$ pH, kai paprastasis PI reguliatorius suderintas 4 lentelės duomenimis esant pH vertei 6.



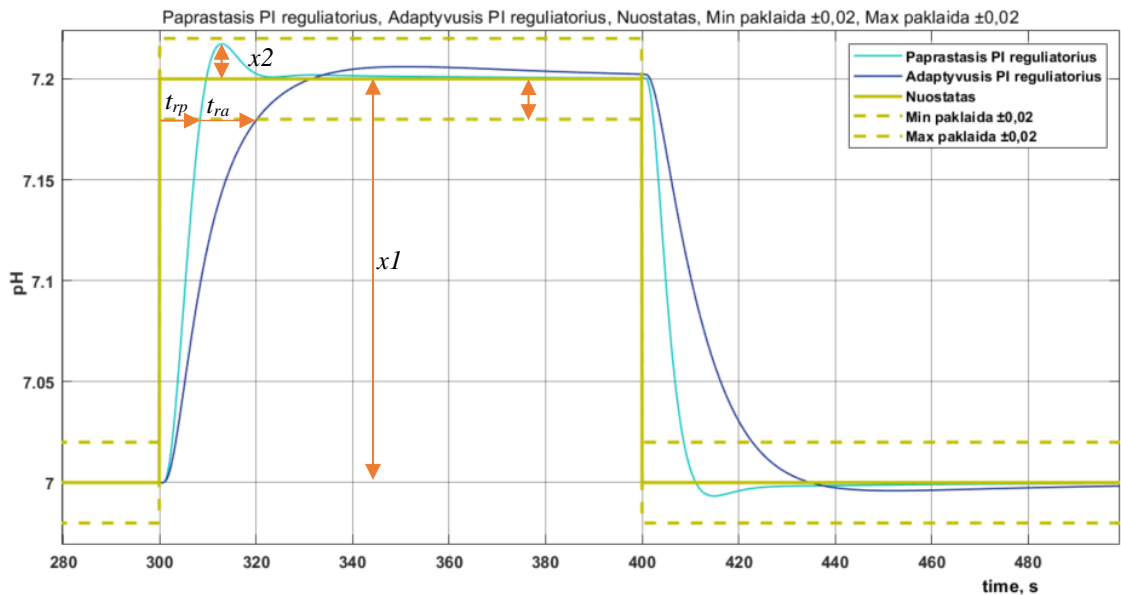
25 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatai 6 įvedamas šuolis ±0,2 pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6

7 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 25 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 17s$	$t_{ra} = 17s$
Δx – leistina statinė paklaida, pH	± 0,02	± 0,02

Automatinės valdymo sistemos pereinamųjų vyksmų kokybinių parametų leistinos ribos, kurios apskaičiuojamos 7 lentelėje.

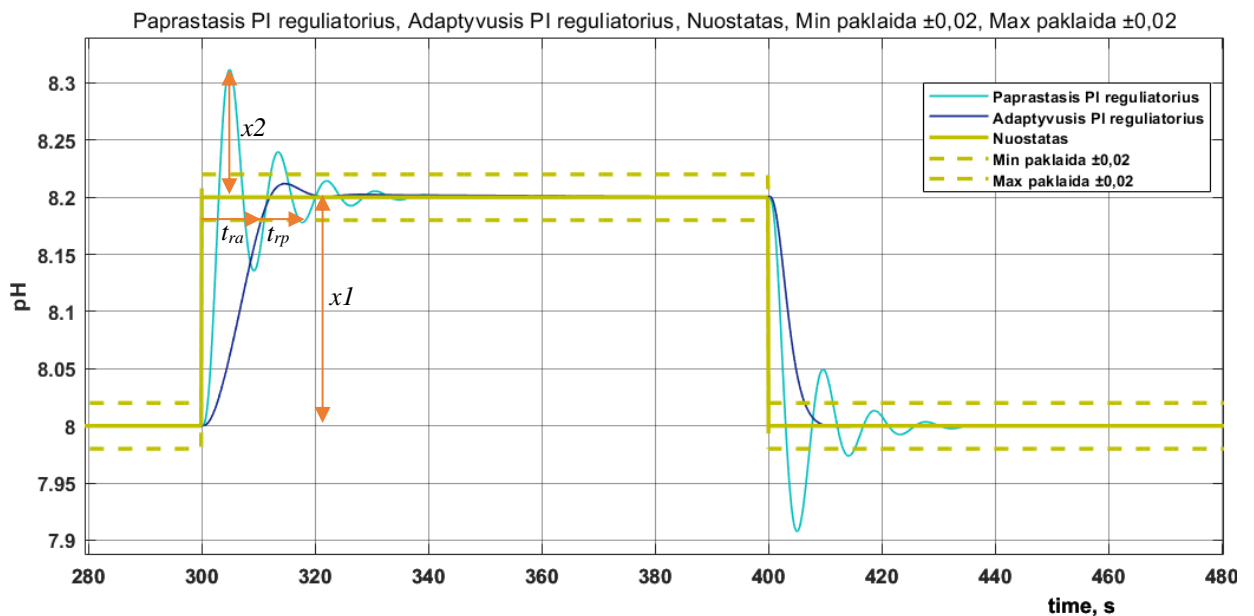
- $\sigma_{leist} = 10 \%$, maksimalus leistinas santykinis dinaminsis nuokrypis;
- $t_{rleist} = 100$ s, leistina reguliavimo trukmė;
- $\Delta x_{leist} = \pm 0,02$ pH, leistina statinė paklaida;



26 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatai 7 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Reguliatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6

8 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 26 pav.

Reguliatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptivusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0,02}{0,2} * 100 = \mathbf{10\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 8s$	$t_{ra} = 20s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

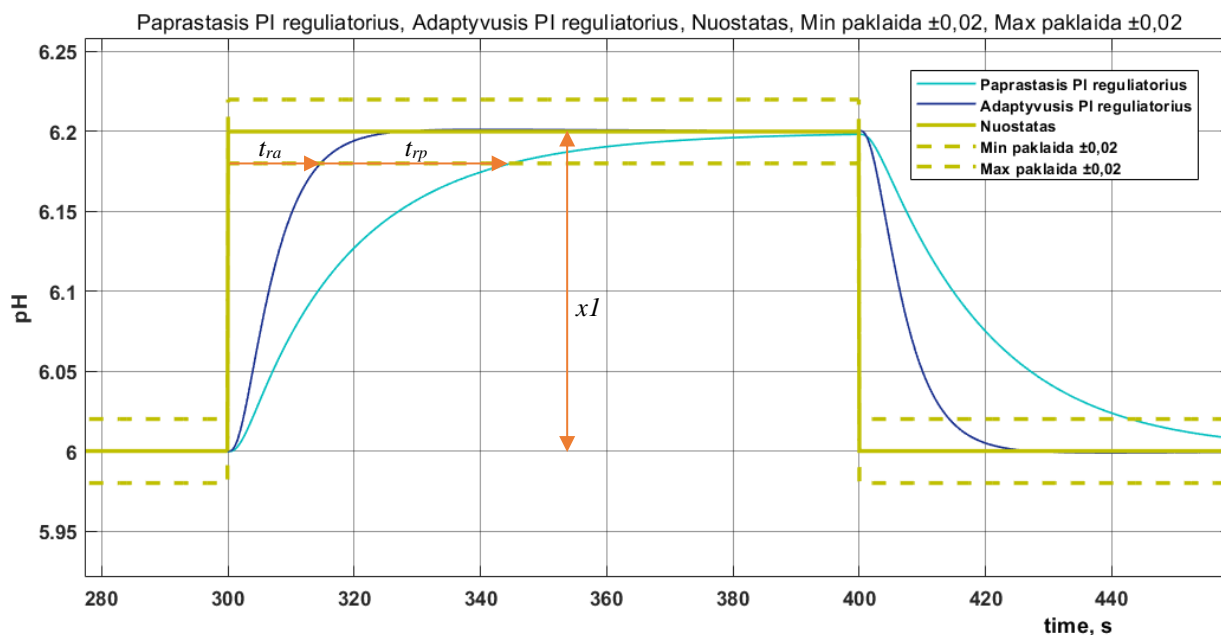


27 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatai 8 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Reguliatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 6

9 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 27 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0,12}{0,2} * 100 = \mathbf{60\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 19s$	$t_{ra} = 10s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

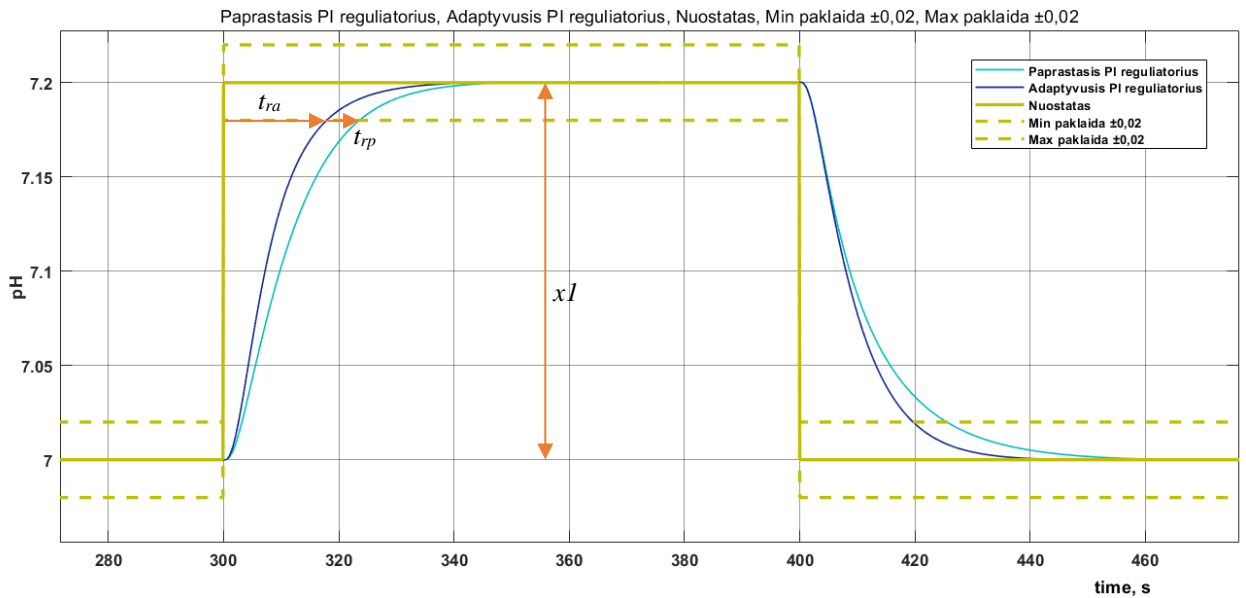
Nuostatui 6, 7, 8 įvedamas pokytis $\pm 0,2$ pH, kai paprastasis PI reguliatorius suderintas 4 lentelės duomenimis esant pH vertei 7.



28 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 6 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7

10 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 28 pav.

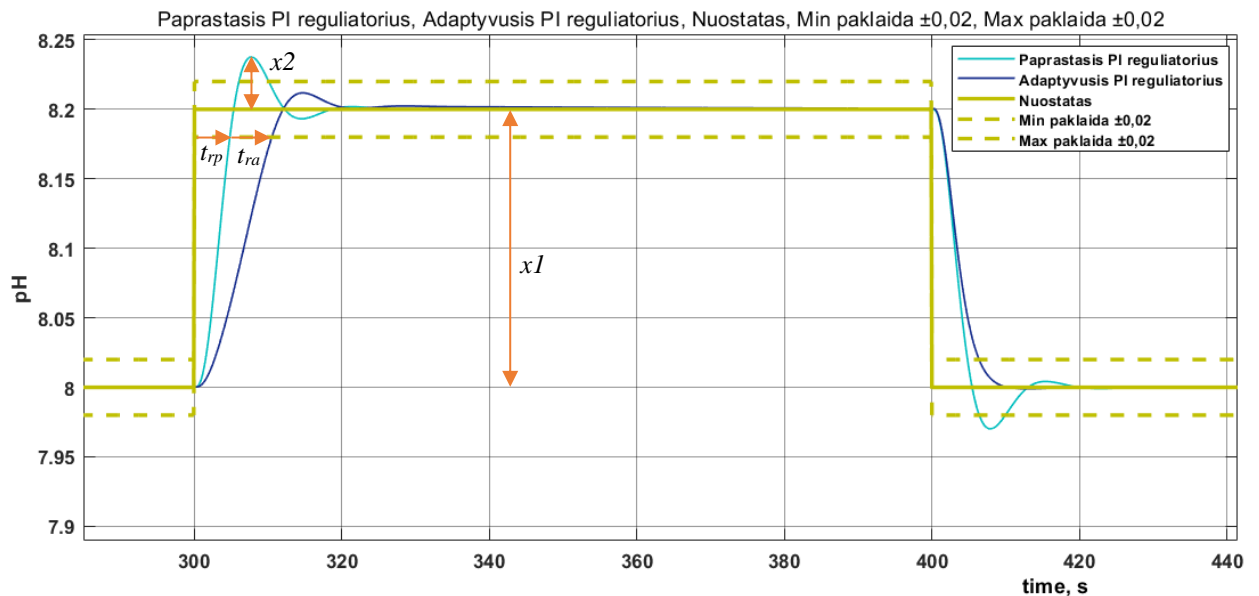
Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 42s$	$t_{ra} = 17s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$



29 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 7 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7

11 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 29 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 22s$	$t_{ra} = 18s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

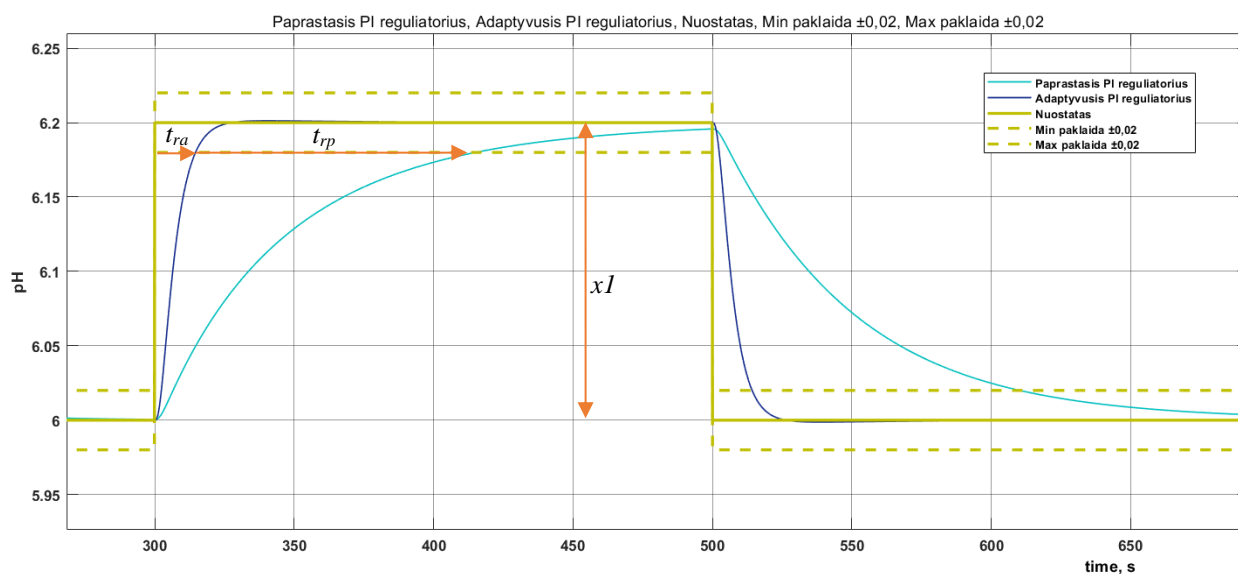


30 pav. pH nuostatui 8 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 7

12 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 30 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI regulatorius	Adaptivusis PI regulatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0,04}{0,2} * 100 = \mathbf{20\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 10s$	$t_{ra} = 5s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

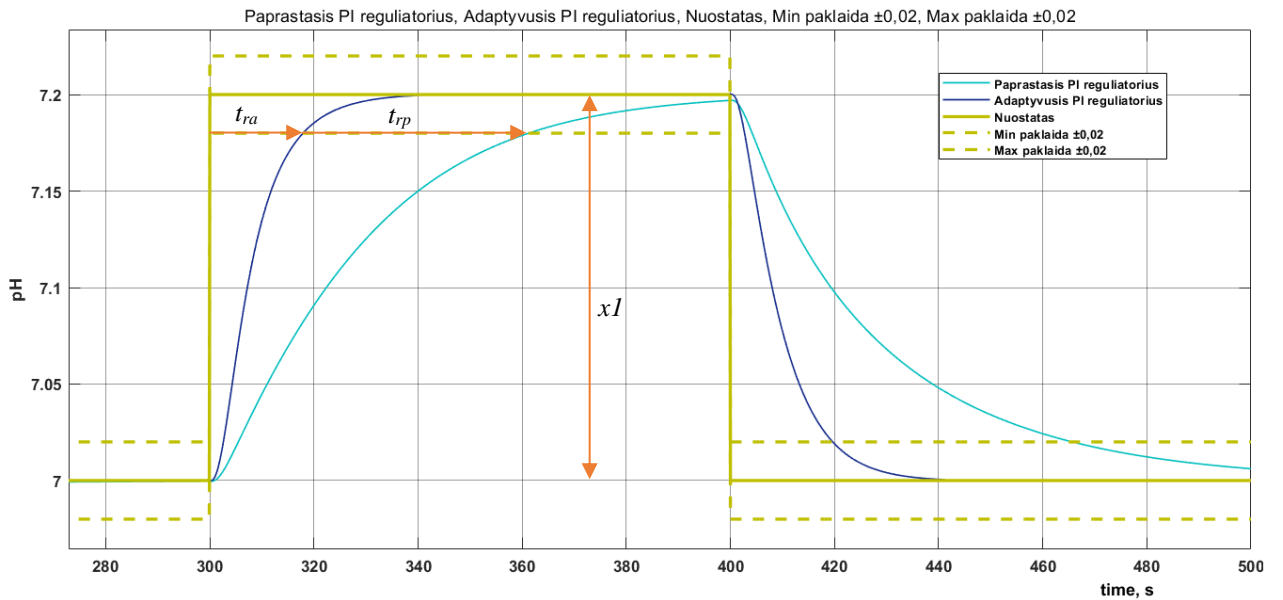
Nuostatui 6, 7, 8 įvedamas pokytis $\pm 0,2$ pH, kai paprastasis PI regulatorius suderintas 4 lentelės duomenimis esant pH vertei 8.



31 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 6 įvedamas šuolis $\pm 0,2$ pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8

13 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 31 pav.

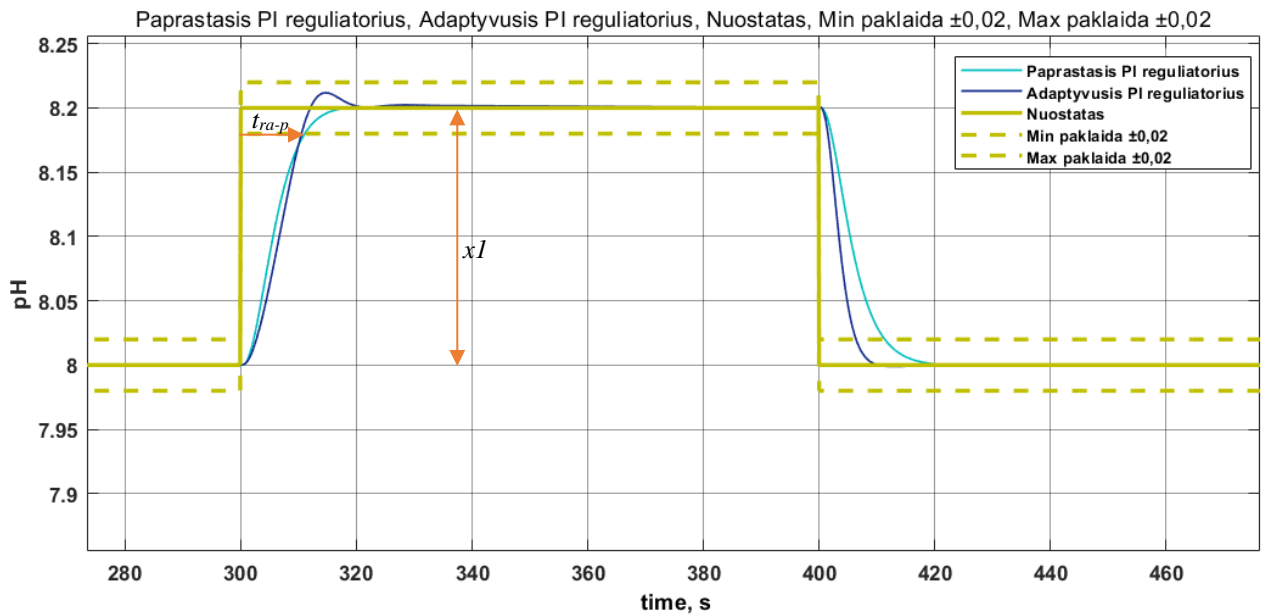
Regulatorius	Paprastasis PI regulatorius	Adaptivusis PI regulatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = \mathbf{0\%}$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 110s$	$t_{ra} = 10s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$



32 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 7 įvedamas šuolis ±0,2 pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8

14 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 32 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 60s$	$t_{ra} = 18s$
Δx – statinė paklaida, pH	± 0,02	± 0,02



33 pav. ARS pereinamieji procesai, kai pH nuostatui 8 įvedamas šuolis ±0,2 pH. Regulatoriaus parametrai naudojami iš 5 lentelės esant pH vertei 8

15 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai iš 33 pav.

Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Adaptyvusis PI reguliatorius
Parametras		
σ – apskaičiuotas perreguliavimas, %	$\sigma_p = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$	$\sigma_a = \frac{x_2}{x_1} * 100 = \frac{0}{0,2} * 100 = 0\%$
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp} = 10s$	$t_{ra} = 10s$
Δx – statinė paklaida, pH	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

Toliau pateikiami apibendrinti automatinės reguliavimo sistemos rezultatai įvedant nuostato pokytį skirtinguose darbo taškuose naudojant 3 skirtingas paprastojo PI reguliatoriaus parametrų kombinacijas. Iš 16 lentelės matyti, kad atliekant reguliavimą naudojant adaptyvųjį ir paprastąjį PI reguliatorius gauti skirtingi kokybiniai pereinamojo proceso parametrai. Didesnį bandymų kiekį leistinų ribų neviršijo adaptyvusis PI reguliatorius.

16 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai keičiant nuostato vertę

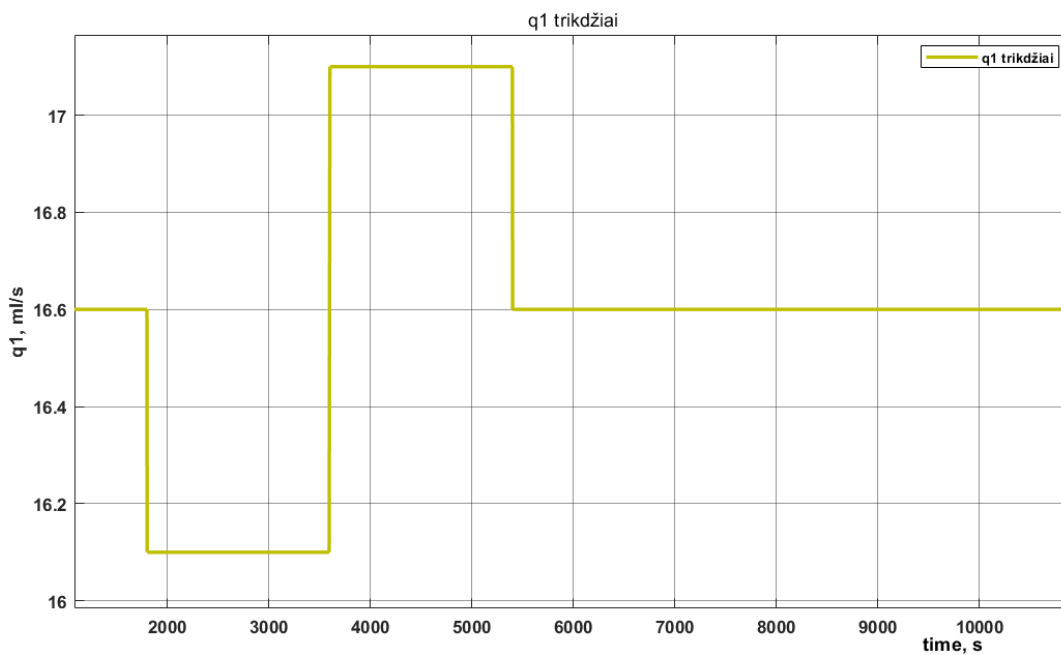
Regulatorius	Paprastasis PI reguliatorius	Daugiau/ mažiau leistinos σ , t_r ribos	Adaptyvusis PI reguliatorius	Daugiau/ mažiau leistinos σ , t_r ribos
σ – perreguliavimas, %	$\sigma_{p1} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a1} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p2} = 10\%$	Mažiau	$\sigma_{a2} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p3} = 60\%$	Daugiau	$\sigma_{a3} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p4} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a4} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p5} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a5} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p6} = 20\%$	Daugiau	$\sigma_{a6} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p7} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a7} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p8} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a8} = 0\%$	Mažiau
	$\sigma_{p9} = 0\%$	Mažiau	$\sigma_{a9} = 0\%$	Mažiau
t_r – reguliavimo trukmė, s	$t_{rp1} = 17\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra1} = 17\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp2} = 8\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra2} = 20\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp3} = 19\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra3} = 10\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp4} = 42\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra4} = 17\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp5} = 22\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra5} = 18\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp6} = 10\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra6} = 5\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp7} = 110\text{ s}$	Daugiau	$t_{ra7} = 10\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp8} = 60\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra8} = 18\text{ s}$	Mažiau
	$t_{rp9} = 10\text{ s}$	Mažiau	$t_{ra9} = 10\text{ s}$	Mažiau
Δx – statinė paklaida	$\pm 0,02$	–	$\pm 0,02$	–

Nuostato pokyčio dalyje atlikti bandymai naudojant adaptyvųjį ir paprastąjį PI reguliatorius, bandymų kokybiniai parametrai pateikti 16 lentelėje. Adaptyvusis reguliatorius visuose 9 bandymų darbo taškuose atitiko užduotas kokybinių parametrų leidžiamas ribas. Paprastasis PI reguliatorius atlikus 9 bandymus ir apskaičiuotus kokybinių parametrų vertes viršijo dinaminę nuokrypį 2 kartus iš 9 bandymų, o tai yra maždaug 22% viso atliktų bandymų. Reguliavimo trukmės įvertinime paprastasis PI reguliatorius neatitiko nustatytų sąlygų 1 kartus iš 9, tai yra 11% bandymų. Vertinant reguliavimo trukmę ir dinaminę nuokrypį kartu paprastasis PI reguliatorius atitiko įvestas ribas 6

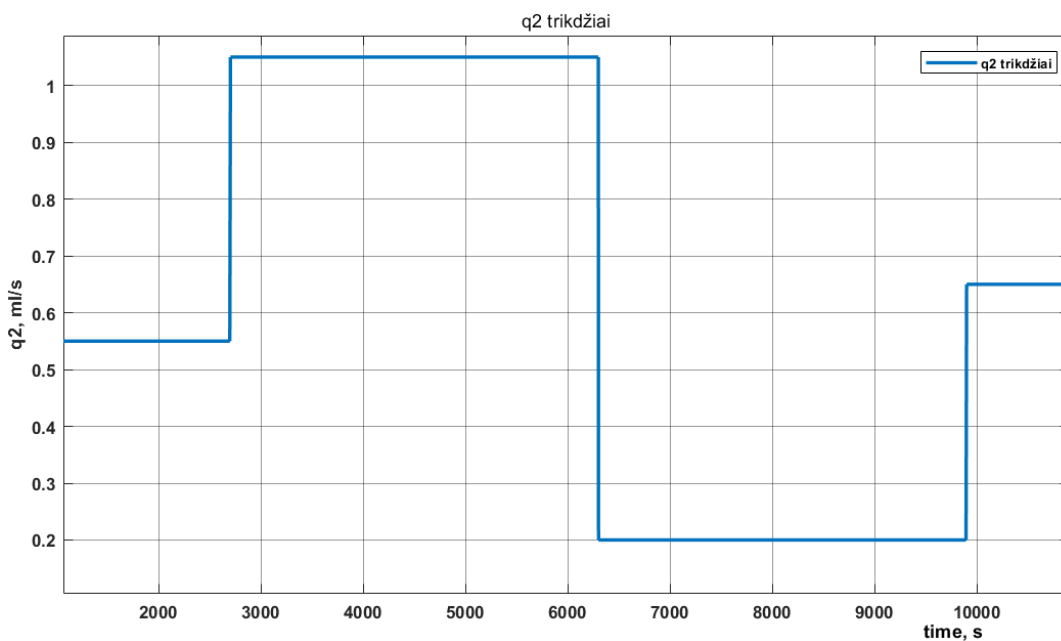
kartus iš 9 bandymų. Taigi, paprastas PI reguliatorius procesą suvaldė 66% viso atliktų bandymų, kai adaptyvusis atitiko sąlygas 100%, tai reiškia, kad sudaryta adaptyvi ARS pagerino paprastojo PI reguliatorius valdymą.

3.3. Tiriamos ARS reakcija į trikdį

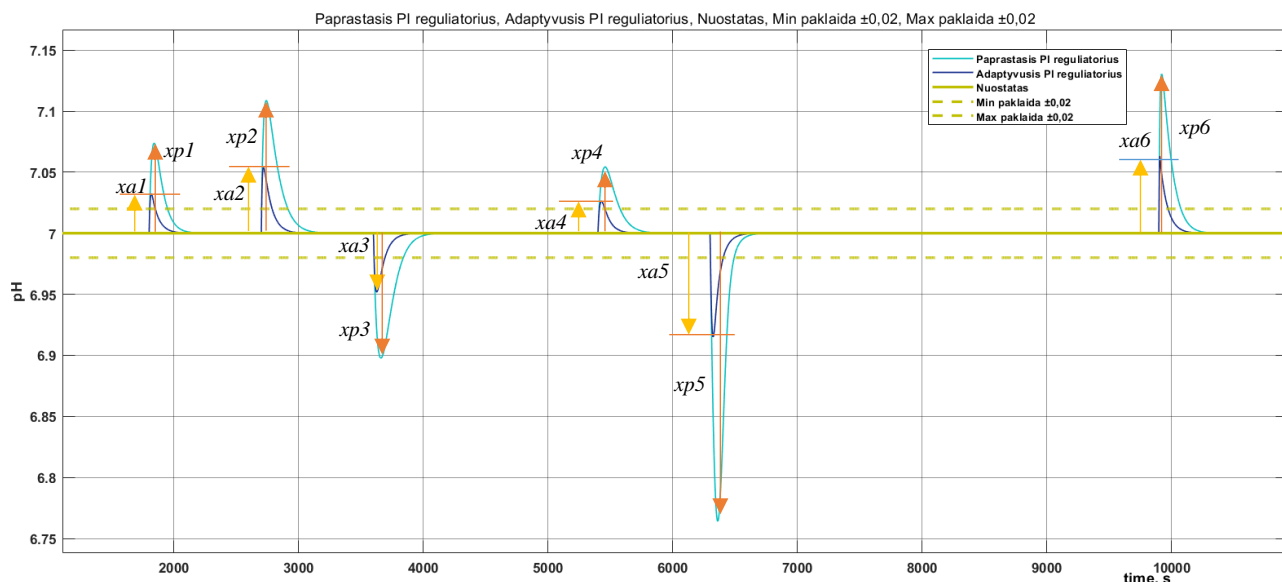
Šiame skyriuje tiriami pereinamojo proceso kokybiniai parametrai įvedant trikdžius pateiktus 34 pav. ir 35 pav., kurių vertės pateiktos 6 lentelėje. Trikdžiu tyrimui lyginamos darbe sudarytos valdymo sistemos, tai adaptyvusis PI reguliatorius ir paprastas PI reguliatorius, kurio parametrų vertės naudojamos suderinus šį reguliatorių darbo taške esant pH 7. Tyrimas atliekamas esant nuostatai 7 pH [4].



34 pav. Įtekančios rūgšties q_1 trikdžio grafikas



35 pav. Įtekančio šarmo q_2 trikdžio grafikas



36 pav. ARS sistemos reakcija, įvedant trikdžius q_1 ir q_2

17 lentelė. Kokybiniai pereinamojo proceso parametrai įvedant trikdžius 36 pav.

Kokybinis parametras	Trikdis ir pokyčio vertė, %	Paprastasis PI reguliatorius	Daugiau/mažiau leistinos ribos	Adaptyvusis PI reguliatorius	Daugiau/mažiau leistinos ribos
x – dinaminis nuokrypis, pH	q_1 , -3,01 %	$x_{p1} = 0,07$ pH	Daugiau	$x_{a1} = 0,03$ pH	Mažiau
	q_2 , +90,91 %	$x_{p2} = 0,11$ pH	Daugiau	$x_{a2} = 0,05$ pH	Mažiau
	q_1 , +6,21 %	$x_{p3} = 0,11$ pH	Daugiau	$x_{a3} = 0,05$ pH	Mažiau
	q_1 , -2,92 %	$x_{p5} = 0,05$ pH	Mažiau	$x_{a5} = 0,02$ pH	Mažiau
	q_2 , -80,96 %	$x_{p6} = 0,23$ pH	Daugiau	$x_{a6} = 0,09$ pH	Mažiau
	q_2 , +225 %	$x_{p8} = 0,13$ pH	Daugiau	$x_{a8} = 0,06$ pH	Mažiau
t_r – reguliavimo trukmė, s	q_1 , -3,01 %	$t_{rp1} = 145$ s	Daugiau	$t_{ra1} = 45$ s	Mažiau
	q_2 , +90,91 %	$t_{rp2} = 211$ s	Daugiau	$t_{ra2} = 85$ s	Mažiau
	q_1 , +6,21 %	$t_{rp3} = 235$ s	Daugiau	$t_{ra3} = 88$ s	Mažiau
	q_1 , -2,92 %	$t_{rp5} = 178$ s	Daugiau	$t_{ra5} = 57$ s	Mažiau
	q_2 , -80,96 %	$t_{rp6} = 202$ s	Daugiau	$t_{ra6} = 99$ s	Mažiau
	q_2 , +225 %	$t_{rp8} = 182$ s	Daugiau	$t_{ra8} = 82$ s	Mažiau
Δx – statinė paklaida	–	$\pm 0,02$	–	$\pm 0,02$	–

Automatinės valdymo sistemos pereinamųjų vyksmų kokybinių parametru leistinos ribos, kurios įvertinamos 17 lentelėje.

- $x_{1leist} = 0,5$ pH, maksimalus leistinas dinaminis nuokrypis;
- $t_{rleist} = 100$ s, leistina reguliavimo trukmė;
- $\Delta x_{leist} = \pm 0,02$ pH, leistina statinė paklaida;

Paprastasis PI reguliatorius atliktuose 8 trikdžio įvedimo bandymuose varijuojant tarp q_2 ir q_1 srautų viršijo dinaminio nuokrypio leistiną vertę 5 iš 6 bandymų ir reguliavimo trukmę visuose bandymuose įvedant trikdį. Paprastasis PI reguliatorius suvaldė procesą ir atitiko visas kokybinių parametru

leistinas ribas, kai buvo keičiamas q_1 srautas -2,92% t.y. nuo 16,1 ml/s į 17,1ml/s. Priešingai nei šis adaptyvusis reguliatorius procesą valdė kokybiškiau, dinaminio nuokrypio leistina vertė neviršyta 6 iš 6 bandymų, o tai lyginant su paprastuoju PI reguliatoriumi yra 6 kartus daugiau bandymų, kuriuose ARS atitiko leistinas sąlygas. Lyginant leistina reguliavimo trukmę adaptyvusis PI reguliatorius jos neviršijo visuose 6 bandymuose. Paparastasis PI reguliatorius leistiną reguliavimo trukmę viršijo 5 iš 6 bandymų.

Išvados ir rezultatai

1. Remiantis [4] straipsnyje pateiktomis diferencialinėmis lygtimis, koeficientais, pradinėmis reikšmėmis ir kita aktualia informacija buvo realizuotas matematinis modelis *MATLAB Simulink* aplinkoje.
2. Tiesioginei pH priklausomybei nuo tirpalų jonų koncentracijos ir bendros krūvių sumos verčių išvesta skaičiavimo formulė, kuri pagrįsta skaitiniu *Niutono* (*angl. Newton*) metodu. Realizuotam skaičiavimo metodui eksperimentiškai parinktas iteracijų skaičius $n=35$.
3. Suderinus PI reguliatorių *Kappa–Tau*, *Ziglerio–Nikolso* (*angl. Ziegler–Nichols*) ir *Cohen–Coon* metodais, geriausi kokybiniai pereinamojo proceso parametrai gauti, naudojant *Ziglerio–Nikolso* (*angl. Ziegler–Nichols*) derinimo metodą. Šiuo metodu gauta mažiausia suminė integralinė paklaida ($IAE=2,424$) ir trumpiausia reguliavimo trukmė ($t_r=51,382s$).
4. Nustatyta, kad suderinus paprastąjį PI reguliatorių bet kuriame pasirinktame darbo taške jis nėra tinkamas naudoti kitame darbo taške, todėl yra pasirenkamas adaptyvusis valdymo metodas.
5. Ištyrus automatinės reguliavimo sistemos pereinamuosius procesus į nuostato pokyčius skirtinguose darbo taškuose ir trikdžius nustatyta, kad ARS su adaptyviuoju PI reguliatoriumi neviršija pereinamojo proceso kokybinių parametrų verčių. Todėl siūloma pH lygio reaktoriuje reguliavimui naudoti adaptyvųjį PI dėsnio reguliatorių, kurio parametrai keičiami priklausomai nuo pH grįžtamojo ryšio vertės.

Literatūros sąrašas

1. Gregory K. McMillan and Robert A. Cameron. *Advanced pH Measurement and Control*.
2. Srinivasan. K, Kaushik. S, Thirukkuralkani. K. N., Sharmila. B. (2018). 2nd International Conference on Smart Sensors and Application. *Analysis on Tuning Strategy of pH Control Process in Paper Industries*. [Žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8535842>
3. Enso I. and Kaddour N. Advanced Process identification and control.
4. Michael A. Henson and Dale E. Seborg. *Adaptive Nonlinear Control of a pH Neutralization Process*. [Žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=317975>.
5. Levišauskas, D. (2008). *Automatinių reguliavimo sistemų derinimas*. Vilnius.
6. Harivardhagini S. and Raghuram A. *PID and Fuzzy Control of pH Neutralization and Split Range Prototype Plants Using LabVIEW*. [Žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8116810>.
7. Galvanauskas, V. ir Simutis, R. (2016). *Hibridinės procesų stebėsenos ir valdymo sistemos*.
8. Edwin A. Herrera and Tito A. Silva. *Anticipative pH Control of Sugarcane Juice*. [Žiūrėta 2023-02-08]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9633278>
9. P. M Meshram and Rohit G. Kanojiya. *Tuning of PID using Ziegler–Nichols Method fo Speed Control of DC Motor*. [Žiūrėta 2023-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6216102>
10. Michael Thai. *Determining and Calculating pH*. [Žiūrėta 2023-02-16]. Prieiga internetu: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Acids_and_Bases/Acids_and_Bases_in_Aqueous_Solutions/The_pH_Scale/Determining_and_Calculating_pH](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Acids_and_Bases/Acids_and_Bases_in_Aqueous_Solutions/The_pH_Scale/Determining_and_Calculating_pH)
11. C. Karthik and M. Rajalakshmi. *Non Linear Structure Identification of pH Process*. [Žiūrėta 2023-02-16]. Prieiga internetu: https://www.researchgate.net/publication/254037689_Non_linear_structure_identification_of_pH_process
12. *Typical Problems in Industrial pH Measurement and Control*. [Žiūrėta 2023-02-19]. Prieiga internetu: <https://www.coleparmer.com/tech-article/industrial-ph-measurement-and-control>
13. Ghanim M. Alwan. *pH Control Problems of Wastewater Treatment Plant*. [Žiūrėta 2023-02-22]. Prieiga internetu: https://www.researchgate.net/publication/320191097_PH_Control_Problems_of_a_Wastewater_Treatment_Plant
14. C. Deslouis, I. Frateur, G. Maurin and B. Tribollet. *Interfacial pH Measurement During the Reduction of Dissolved Oxygen in a Submerged Impinging Jet Cell*. [Žiūrėta 2023-02-22]. Prieiga internetu: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1018430224622>
15. *Newton's Method*. [Žiūrėta 2023-01-06]. Prieiga internetu: <https://calcworkshop.com/derivatives/newtons-method/>
16. S. J. Garrett. *Introduction to Actuarial and Financial Mathematical Methods*. ISBN: 978-0-12-800156-1. Chapter 13.1.2.
17. P. J. Lagace, H. Voung and I. Kamwa. *Improving Power Flom Converge by Newton Raphson with a Levenberg–Marquardt Method*. [Žiūrėta 2023-02-04]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4596138>
18. Galvanauskas, V., Simutis R. „*Hibridinės procesų stebėsenos ir valdymo sistemos*“. 2016.

19. Abhijit Guha. *Transport and Deposition of Particles in Turbulent and Laminar Flow*. [Žiūrėta 2022-11-06]. Prieiga internetu: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102220>
20. *Laminar Flow and Turbulent Flow*. [Žiūrėta 2022-11-06]. Prieiga internetu: <https://theconstructor.org/fluid-mechanics/laminar-turbulent-flow/559432/>
21. S. Abdulsalam and Z. Maiwada. *Production of Emulsion House Paint Using Polyvinyl Acetate and Gum Arabic as Binder*. [Žiūrėta 2022-12-06]. Prieiga internetu: https://www.researchgate.net/publication/293012518_Production_of_Emulsion_House_Paint_Using_Polyvinyl_Acetate_and_Gum_Arabic_as_Binder#fullTextFileContent
22. *Tinkamas Dirvožemio Rūgštingumas, pH*. [Žiūrėta 2022-04-08]. Prieiga internetu: <https://zinaukaip.lt/namai/sodas/tinkamas-dirvozemio-rugstingumas-ph/#gsc.tab=0>
23. *How to Calculate pH from the Hydrogen-ion Concentration*. [Žiūrėta 2022-11-06]. Prieiga internetu: <https://study.com/skill/learn/how-to-calculate-ph-from-the-hydrogen-ion-concentration-explanation.html>
24. M. Bozorg. *Linear Systems with Polynomial Uncertainty Structure: Stability Margins and Control*. [Žiūrėta 2023-05-10]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7076479>
25. N. Darogheh. *High Gain Adaptive Control of A Neutralization Process pH*. [Žiūrėta 2023-05-10]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5192444>
26. H. Jung and D. Cho. *Evaluation of pH control Agents Influencing on Corrosion of Carbon Steel in Secondary Water Chemistry Condition of Pressurizes Water Reaction*. [Žiūrėta 2023-04-22]. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S173857331530139X>
27. H. Kawamura. *PWR Secondary Water Chemistry Guidelines in Japan Purpose and Technical background*. [Žiūrėta 2023-04-23]. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197019300356>
28. Cristina I. Muresan and Robin De Keyser. *Revisiting Ziegler–Nichols. A fractional order approach*. [Žiūrėta 2023-04-24]. Prieiga internetu: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0019057822000234?token=0D54CEE6507769C180FE472CB75632506B72129486FE88E421F8CD8C0FD5F045ABC8BFCAE169200816D2B588C56EB10C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230513095408>
29. C. Lorenzini, A. Bazanella and L. Fernando Alves Pereira. *PID Tuning Based on Forces Oscillation for Plants Without Ultimate Frequency*. [Žiūrėta 2023-04-26]. Prieiga internetu: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405896318304117?token=C165748C99EF89F87E2885986B94431465CB6D5AD46A94E8BF046716E36A3C8767E9FC5D0C62AAC25E16F79F03718B45&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230513095652>
30. Albert Norberg. *Kappa Tuning– Improves relay auto–tuning for PID controller*. ISSN 0280-5316. 1999.
31. James Bennett, Ajay Bhasin, Jamila Grant and Wen Chung Lim. *PID Tuning via Classical Methods*. [Žiūrėta 2023-04-27]. Prieiga internetu: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/09%3A_Proportional-Integral_Derivative_\(PID\)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral_Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods)
32. M. Iavanya, Amarnath.K.T, T. Kavita and Niranjana Padhi. *An Over view of pH Neutralization of water using PID and Fuzzy controller*. [Žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga internetu: https://www.researchgate.net/publication/289477755_An_over_view_of_pH_neutralization_of_water_using_PID_FUZZY_controller

Priedai

1 priedas. Proceso matematinio modelio struktūra

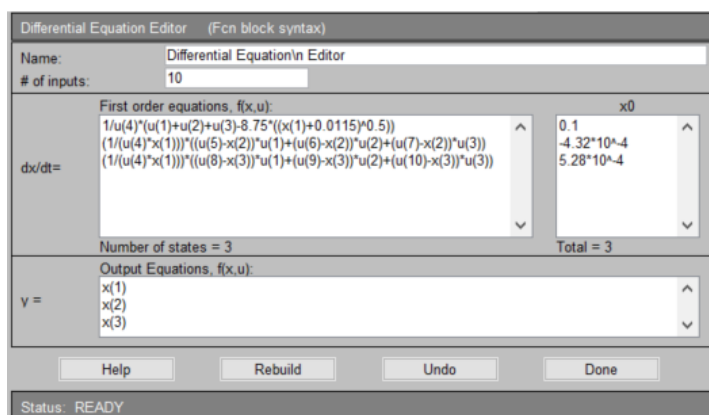
Simboliai naudoti proceso diferencialinių lygčių realizavimo bloke DEE (34 pav.):

Išėjantys:

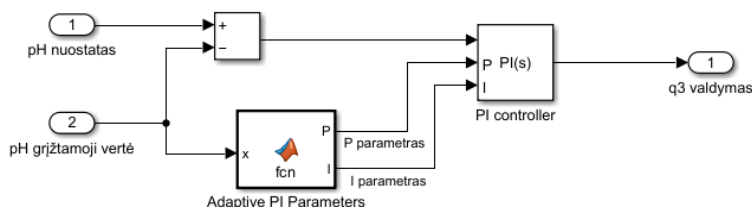
- $u(1)$ – įtekantis azoto rūgšties tirpalas, q_1 ;
- $u(2)$ – įtekantis natrio hidrokarbonato tirpalas, q_2 ;
- $u(3)$ – įtekantis natrio hidroksidas, q_3 ;
- $u(4)$ – reaktoriaus plotas, A ;
- $u(5)$ – reakcijos pastovioji, W_{a1} ;
- $u(6)$ – reakcijos pastovioji, W_{a2} ;
- $u(7)$ – reakcijos pastovioji, W_{a3} ;
- $u(8)$ – reakcijos pastovioji, W_{b1} ;
- $u(9)$ – reakcijos pastovioji, W_{b2} ;
- $u(10)$ – reakcijos pastovioji, W_{b3} .

Išėjantys:

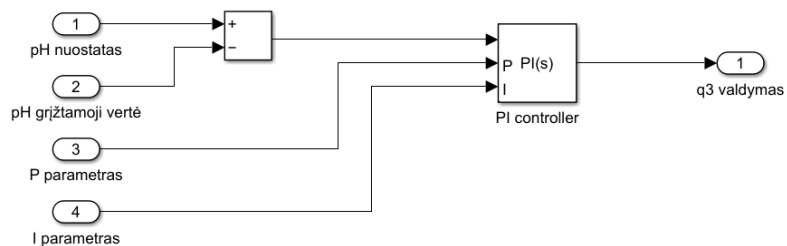
- $x(1)$ – reaktoriaus aukštis, h ;
- $x(2)$ – reakcijos pastovioji, W_{a4} ;
- $x(3)$ – reakcijos pastovioji, W_{b4} .



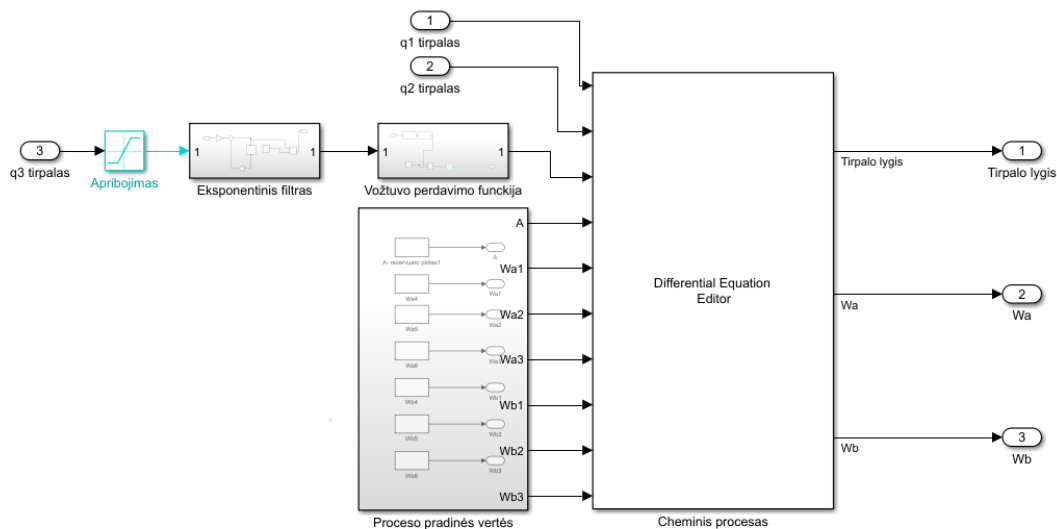
37 pav. Diferencialinių lygčių realizacija DEE bloke



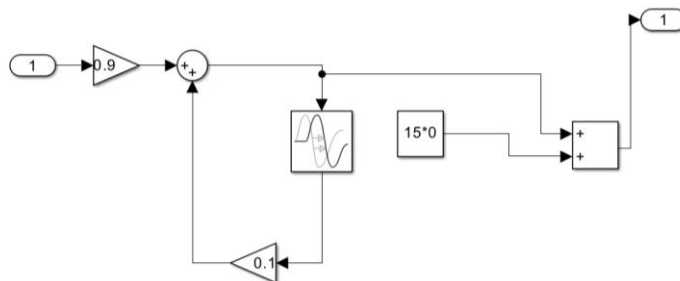
38 pav. Adaptyvaus PI reguliatoriaus struktūra



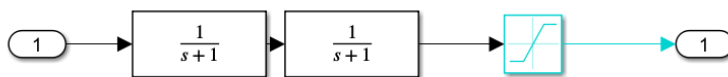
39 pav. Paprasto PI regulatoriaus struktūra



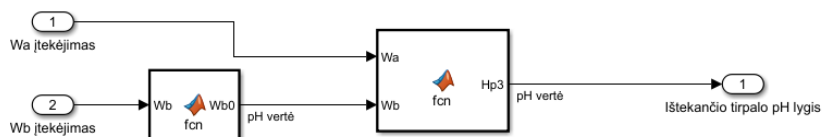
40 pav. Cheminio proceso sudarytas modelis



41 pav. Eksponentinis filtras



42 pav. Vožtuvo perdavimo funkcija su neigiamu apribojimu



43 pav. Niutono metodo realizacijos struktūra