

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Pranas Balsys

OPTIMALAUS VALDYMO DĖSNIO TYRIMAS IR TAIKYMAS
DRUSKOS TIRPALO RUOŠIMO SISTEMAI

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Romas Rutkauskas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

**OPTIMALAUS VALDYMO DĖSNIO TYRIMAS IR TAIKYMAS
DRUSKOS TIRPALO RUOŠIMO SISTEMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Romas Rutkauskas
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Jolanta Repšytė
(data)

Projektą atliko

(parašas) Pranas Balsys
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Pranas Balsys

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Optimalaus valdymo dėsnio tyrimas ir taikymas
druskos tirpalo ruošimo sistemai“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 2 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Prano Balsio** baigiamasis projektas tema „Optimalaus valdymo dėsnio tyrimas ir taikymas druskos tirpalo ruošimo sistemai“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

Balsys, P. Optimalaus valdymo dėsnio tyrimas ir taikymas druskos tirpalo ruošimo sistemai. *Magistro laipsnio baigiamasis projektas/ vadovas* doc. dr. Romas Rutkauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2015. 40 psl.

SANTRAUKA

Šiuo magistro darbu siekiama optimizuoti esamą druskos tirpalo ruošimo sistemą, pritaikant klasikinius valdymo dėsnius. Darbe aprašyta esama sistema, identifikuotos problemos ir iškelti nauji – efektyvesnio proceso valdymo tikslai. Nepaisant didelio literatūros ir taisyklių kiekio kaip derinti ir taikyti skirtingus reguliatorius, yra mažai žinių kaip praktiškai pažiūrėti į sudėtingą sistemą ir perkelti reguliatorių derinimo žinias į realią sistemą. Šis darbas yra teorinių literatūros žinių ir empirinių proceso duomenų bei matematinio modelio sudarymo uždavinys, siekiant gauti geriausius įmanomus valdymo rezultatus. Esama sistema buvo pakeista pridėdant suprojektuotą PID valdiklį, rezultatai patikrinti darbinėmis sąlygomis su esamais trikdžiais.

Balsys, P. Research and application of the optimal control principle for brine preparing system. Final project of *master degree* / supervisor doc. dr. Romas Rutkauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Automation.

Kaunas, 2015. 40 p.

SUMMARY

The present Master's thesis seeks to develop (establish) a classical/ optimal regulator's gain to the specific saline preparing system . As a starting point, recent problems of the system and new goals was presented. Despite of the huge amount of regulators tuning rules and literature it is known relatively little how practically to look at complex process and moreover – establish . Thus, on the basis of both a study of the literature and analysis of the empirical data collected through process research, this thesis established a conjunction between empirical modeling and simulation results of problematic process and on-site results with focus on best process control algorithm creation. As a result, an existing system was adjusted by adding PID regulator and tested on-site with typical environmental conditions and errors to have proven its effectiveness of control algorithm's choice.

TURINYS

<i>IVADAS</i>	7
<i>1. DRUSKOS TIRPALO SISTEMA IR PROBLEMATIKA</i>	8
<i>1.1 Druskos tirpalo ruošimo sistemos aprašymas</i>	8
<i>1.2 Įgyvendintos sistemos valdymo problematika</i>	10
<i>1.3 Sistemos valdomumo nustatymas</i>	12
<i>2. VALDYMO SPRENDIMŲ APŽVALGA</i>	14
<i>2.1 Reguliatorių taikymai valdymo sistemoms</i>	14
<i>2.2 Impulso pločio moduliacijos taikymas</i>	17
<i>2.3 Procesų modeliavimo metodika</i>	18
<i>3. MATEMATINIS TIRPALO RUOŠIMO PROCESO MODELIS</i>	20
<i>3.1 Matematinis talpos modelio aprašymas</i>	20
<i>3.1.1 Fiziniai sistemos duomenys</i>	20
<i>3.1.2 Proceso kintamieji ir trikdžiai</i>	20
<i>3.1.3 Sistemos lygtys ir prielaidos</i>	21
<i>3.2 Matematinis modeliavimas su P ir PI reguliatoriais</i>	22
<i>3.3 Matematinis modeliavimas su Fuzzy reguliatoriumi</i>	29
<i>4. EKSPERIMENTINIS REGULIATORIAUS PARAMETRŲ TAIKYMAS</i>	35
<i>4.1 Eksperimento įgyvendinimas</i>	37
<i>4.2 Rezultatų apibendrinimas</i>	37
<i>IŠVADOS</i>	39
<i>INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS</i>	40
<i>PRIEDAI</i>	41
<i>Priedas 1. Sistemos valdomumo nustatymo duomenys</i>	41
<i>Priedas 2. Principinės eksperimento pajungimo schemos</i>	42
<i>Priedas 3. Programinis reguliatorių valdymo, duomenų nuskaitymo kodas</i>	45
<i>Priedas 4. Eksperimento duomenys (omc.txt failas)</i>	

Ivadas

Daugelyje pasaulio ir Lietuvos pramonės įmonių procesai yra automatizuoti. Tai ne naujiena. Tačiau tik nedaugelyje įmonių svarstoma apie automatizuotų sistemų našumą, jų tobulinimą, optimizavimą ir energetinių išteklių sunaudojimo mažinimą. Šiame darbe apžvelgiamas tipinis automatizuotas procesas – druskos tirpalo paruošimas žuvies brandinimui. Įvardinami proceso valdymo trūkumai kaip: per ilgas ruošimo laikas, per didelės statinės paklaidos (koncentracijos ir tūrio). Tai yra papildomi kaštai įmonei, kuriuos būtų galima sutaupyti pritaikius optimalius valdymo sistemos dėsnius. Šio darbo tikslas – esamos sistemos optimizavimas, pritaikius optimalų valdymo dėsnį. Darbas yra taikomojo pobūdžio. Apžvelgta klasikinio PID ir „fuzzy“ reguliatoriaus taikymo metodika. Sistema išanalizuota, sukurtas ir aprašytas diferencialinėmis lygtimis druskos ruošimo talpos matematinis modelis. Atsižvelgiant į empirinį modelį ir sistemos parametrus, sumodeliuoti valdomo proceso reguliatoriai, parinkti optimalūs reguliatorių parametrai ir neraiškių aibių reguliatoriaus taisyklės. Geriausius rezultatus generavęs sistemos P ir PI reguliatorius ištestuotas realioje sistemoje.

1.1 Druskos tirpalo ruošimo sistema

Druskos tirpalo ruošimo sistema skirta vartotojo parinktai tirpalo koncentracijai ruošti. 20 % druskos koncentratas atiteka vartotojo įrengtais vamzdžiais iš druskos koncentrato talpų. Atitekėjęs koncentratas maišomas su vandeniu, taip gaunant norimos koncentracijos, žuvies brandinimui skirtą tirpalą. Priklausomai nuo žaliavos ir artikulo šis tirpalas dažniausiai turi būti 8 arba 10 % koncentracijos. Tirpalas maišomas 600 l talpoje, į kurią ateina druskos koncentrato vamzdis (atstumas nuo pneumatinės sklendės iki maišymo talpos 7 m), vandens padavimo vamzdis bei maišymo siurblio vamzdis. Talpa atvaizduota **1.1 a pav.**, o koncentrato pneumatinė sklendė su vamzdžiu **1.1 b pav.**.



1.1 pav. a) druskos tirpalo paruošimo talpa

b) druskos koncentrato vamzdynas ir pneumatinė sklendė

Sklendė yra diskretinė ir valdoma pneumatiniu oro skirstytuvu. Skirstytuvai yra normaliai uždaryti, o užmaitintas 24 V nuolatinės įtampos atsidaro – t.y. dozuoja koncentratą. Dozavimas vyksta impulsais. Sklendė būna atidaryta 5 s. Per šį laiką patekęs koncentratas maišomas su vandeniu. Vanduo įleidžiamas taip pat 5 s impulsu. Maišymui naudojamas siurblys. Jei po 300 s koncentracija yra per maža, sklendė vėl atidaroma 5 s, jei per didelė – papildomai dozuojamas vanduo. Koncentracijos lygis nustatomas vizualizavimo įrenginyje „Mettler Toledo Metron 300“ (**1.2 a pav.**). Šis įrenginys turi 4 diskretinius, 2 analoginius išėjimus ir 2 analoginius įėjimus. Vienas iš analoginių įėjimų naudojamas druskos tirpalo laidumo (koncentracijos) jutikliui prijungti. Reliniai išėjimai naudojami pneumatinės sklendės skirstytuvui valdyti, maišymo siurbliui, vandens dozavimo siurbliui įjungti ir išjungti. **1.2 b pav.** pavaizduoti vamzdžiai įeinantys į druskos tirpalo ruošimo talpą.



1.2 pav. a) Tirpalo koncentracijos įvedimo ir atvaizdavimo įrenginys

b) Maišymo talpos įeinantys vamzdžiai (iš kairės pusės: pamaišymo, koncentrato, vandens)

Sistemoje realizuoti du valdymo režimai: automatinis ir rankinis. Jie pasirenkami rankenėlės pozicija ant valdymo spintos durų (**1.3 pav. a**)). Automatiniame režime operatorius įveda reikiamo tirpalo koncentraciją ir norimą kiekį (tūrį) ir laukia kol tirpalas bus paruoštas. Leistina paklaida gali varijuoti 0,2 % ribose. Tai reiškia, kad jei paklaida bus didesnė nei ši riba, sistema papildomai dozuos vandenį ar druskos koncentratą, nepriklausomai nuo to, koks užduotas tirpalo kiekis. Rankiniu būdu operatorius rankenėlių pasukimais pats dozuoja koncentratą ir vandenį bei bando išgauti norimą koncentraciją, neviršijančią 0,2 % paklaidos.



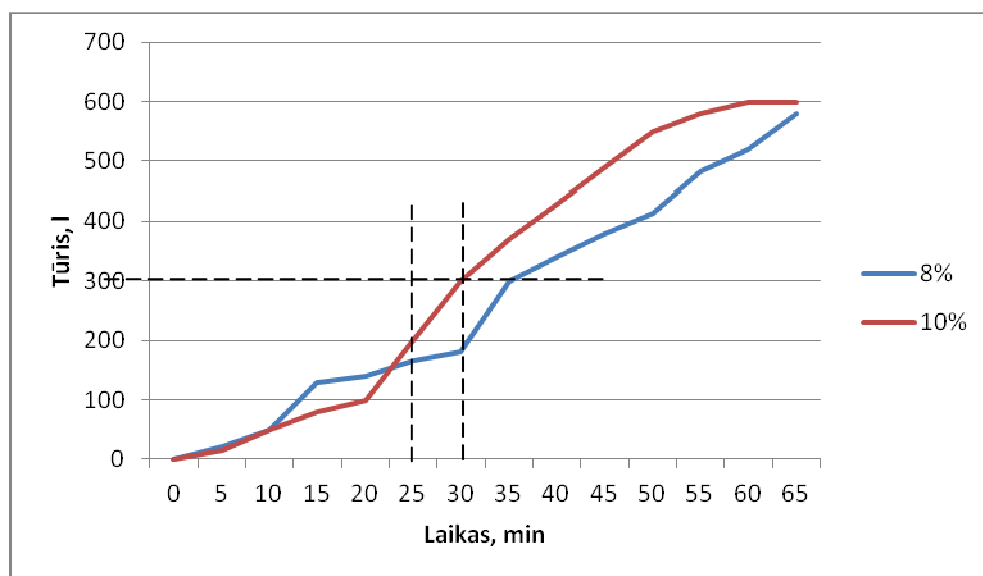
1.3 pav. a) Valdymo spintos operatoriaus darbo vieta

b) Valdymo spintos įranga

1.2 Esamos sistemos valdymo problematika

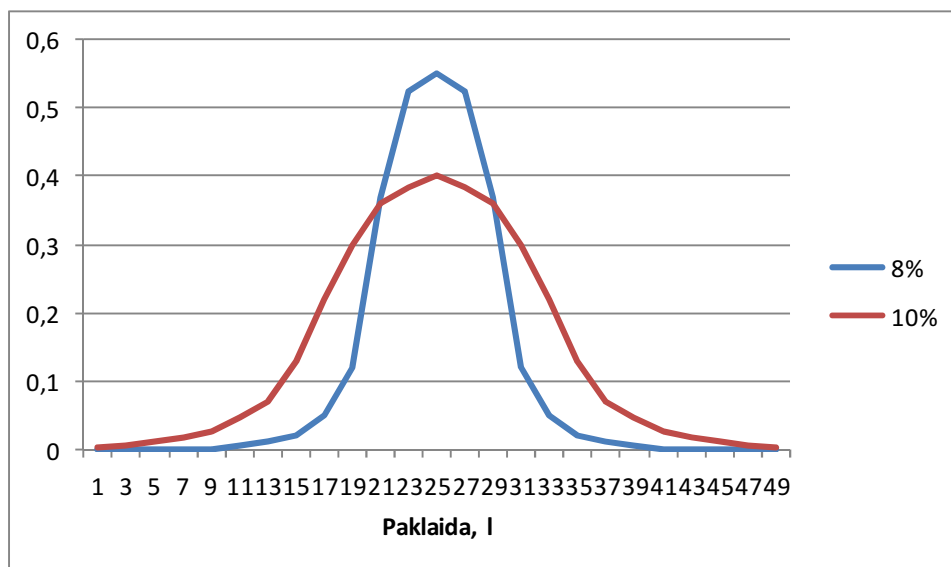
Tiek druskos tirpalo ruošimo technologijos požiūriu, tiek ir techniniu požiūriu, sistema nėra tiksli. Siekiama, kad sistema turėtų maksimaliai mažą paklaidą, ne daugiau kaip 0,1 %. Taip pat sistema yra per lėta – priklausomai nuo užduoto norimo tirpalo kiekio, maišymas gali trukti nuo 15 iki 60 minučių (nuo 100 iki 600 l kiekiui paruošti). Paveiksle **1.4 pav.** yra atvaizduotas vidutinis maišymo laikas pagal norimą druskos tirpalo koncentraciją ir tūrį. Kaip matyti iš grafiko, kuo didesnis norimas tūris ir mažesnis koncentracija – tuo ilgesnis maišymo laikas. Tai esamo neefektyvaus valdymo pasekmė. Nauja sistema turėtų garantuoti maksimalią ruošimo greitaveiką.

Esama sistema dažnai sumaišo didesnę ar mažesnę tūrį tirpalo, nei užduota reikšmė. Tai vyksta dėl to, kad esant per didelei ar per mažai tirpalo koncentracijai, papildomai dozuojamas vanduo ar koncentratas kol gaunama užduota vertė. Tokiu atveju, perviršijama arba nepasiekiamas užduotas tūrio vertė. Dažniausiai vertės svyruoja nuo 5 iki 50 l. Grafike **1.5 pav.** atvaizduoti vidutiniai perviršijimo kiekiai. Jie aproksimuojami kaip normaliniai skirstiniai.



1.4 pav. Maišymo laiko vidurkio priklausomybė nuo ruošiamo tirpalo

Iš grafiko matyti, kad kuo mažesnė koncentracija, tuo ilgesnis maišymo laikas to paties norimo tūrio. Tai iliustruoja horizontali punktyrinė linija.

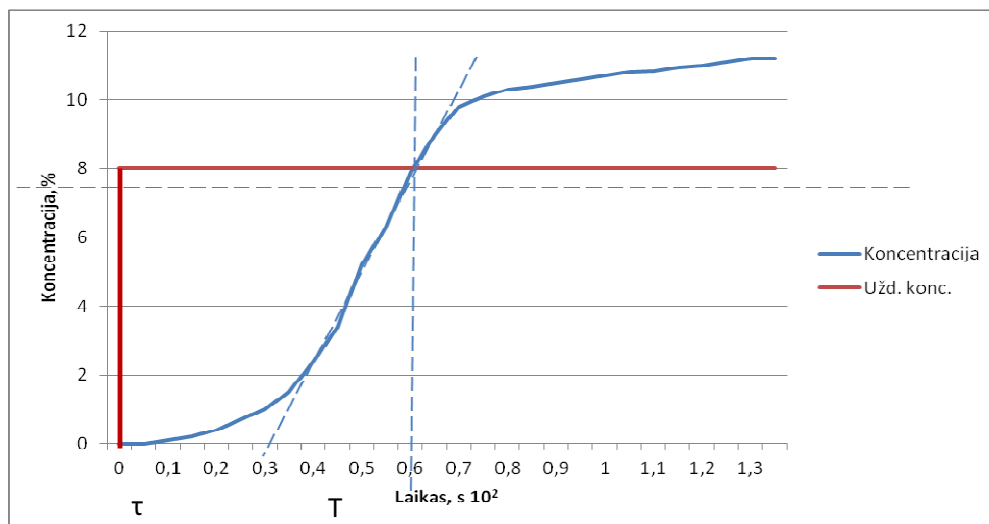


1.5 pav. Perviršyto tūrio paklaidos dažnumas

Iš grafiko matyti, kad 8 % koncentracijos tirpalo standartinis nuokrypis yra 5 l, o 10 % tirpalo – 8 l. Taigi, 8 % tirpalą standartiškai maišo ilgiau, bet gauto kiekio paklaidos yra pastovesnės.

1.3 Sistemos valdomumas

Tiriamai sistemai, pagal Zieglerio-Nicholso šuolinės reakcijos metodą, buvo paduotas šuolinis trikdys, siekiant gauti atviros sistemos reakcijos charakteristikas [1]. Buvo fiksuojamas sistemos tirpalo koncentracijos kitimas laiko atžvilgiu. Taip pat buvo fiksuojamas tirpalo tūrio (masės) kitimas. Gauti eksperimentiniai rezultatai pateikti lentelėje (žr. **Priedas 1**). Rezultatai atvaizduoti grafiškai paveiksluose **1.6 pav.** ir **1.7 pav.** Nurodytos norimos pasiekti reikšmės: 8 % NaCl koncentracija ir 130 kg masė (šuoliniai trikdžiai).



1.6 pav. Užduotos ir gautos koncentracijos charakteristikos

Pagal valdomumo santykio teoriją (*angl.* controllability ratio), sistemos valdomumas yra tiesiogiai proporcingas vėlinimui ir atvirkščiai proporcingas vėlinimo ir laiko pastoviosios sumai [2, p. 2]:

$$CR = \frac{\tau}{\tau + T} \quad (1.1)$$

Jei santykis:

< 0,2 sistema lengvai valdoma, nėra problemų užtikrinant gerą valdymą;

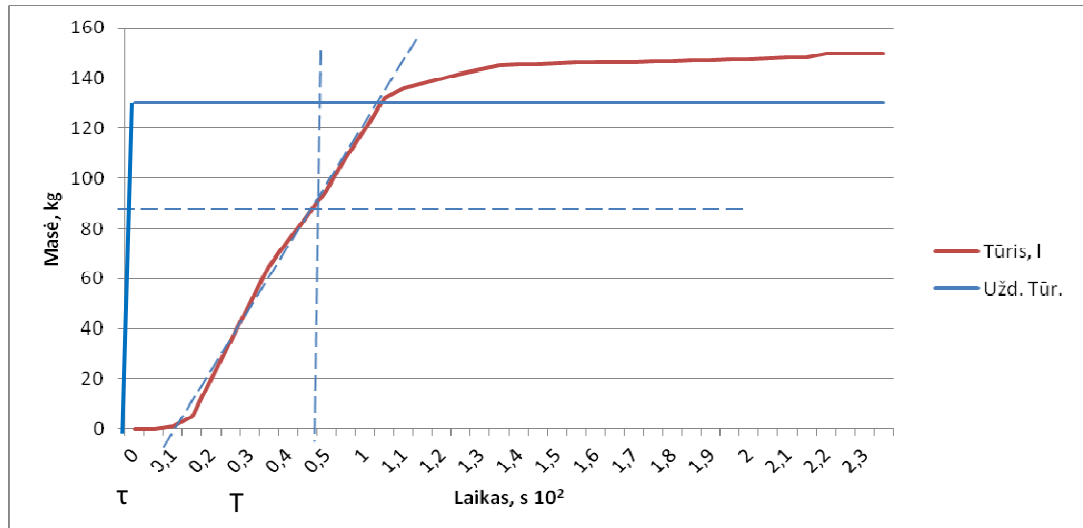
0,2-0,5 reikia tinkamai suderinti;

> 0,5 sistema sunkiai valdoma, labai sudėtinga užtikrinti gerą valdymą .

Nagrinėjamu atveju, vėlinimas τ ir laiko pastovioji T apskaičiuojami iš sistemos be grįžtamojo ryšio šuolinės charakteristikos ir yra lygūs po 30 s. Tokiu atveju sistemos valdomumo santykis yra lygus:

$$CR = \frac{\tau}{\tau + T} = \frac{30}{30 + 30} = 0,5 \quad (1.2)$$

Eksperimentinės sistemos koncentracija yra vidutiniškai valdoma, tik reikia tinkamai suderinti. Statinė koncentracijos paklaida yra 28 %. Analogiškai skaičiuojamas ir sistemos valdomumo santykis tūriui (masei) suvaldyti.



1.7 pav. Užduoto bei gauto tūrio ir laiko priklausomybė

Iš grafiko matyti, kad valdomumo santykis šiuo atveju yra:

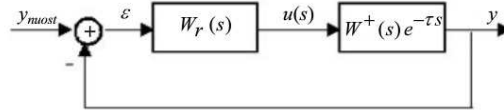
$$CR = \frac{\tau}{\tau + T} = \frac{10}{10 + 38} = 0,2 \quad (1.3)$$

Tirpalo masė gali būti lengvai kontroliuojama. Statinė sistemos paklaida yra 13,3 %.

2.1 Reguliatorių taikymai valdymo sistemoms

Kiekvieną kartą maišant naują tirpalo tūrį ir koncentraciją, pradinės sąlygos nėra žinomos. T.y. nėra žinoma koks druskos kiekis likęs ant maišymo talpos sienelių. Kas kartą jis skirtingas, taigi įprastos proporcijos lygtys šio uždavinio neišspręs. Būtina naudoti vieną iš valdymo dėsnių. Didžiausias valdymo iššūkis šioje sistemoje yra 2 kontroliuojami procesai (2 valdymo dėsniai ar reguliatoriai), valdantys druskos koncentrato vamzdžio sklendę bei vandens vožtuvą vienu metu. Praktikoje naudojama keletas valdymo algoritmų tokioms sistemoms spręsti [3]. Labiausiai tinkantys yra kaskadinis PID reguliatorius ir neraiškių aibių - fuzzy reguliatorius.

Procesams su vėlavimu valdyti galima naudoti įprastines vienkontūrinės grįžtamojo ryšio sistemas (**2.1 pav.**).



2.1 pav. Proceso su vėlavimu vienkontūrės valdymo sistemos struktūra ($W(s)$ – „normalios“ dinamikos perdavimo funkcija)

Derinant PID reguliatorius labai svarbu žinoti kaip elgiasi kiekviena iš reguliatoriaus dedamųjų. Bene plačiausiai paplitęs pirmos eilės sistemos su vėlinimu Zieglerio – Nicholso derinimo metodas. Tarkime, kad turime tokią modifikuotą PID reguliatoriaus lygtį:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_D \frac{d e(\tau)}{d\tau} \right] \quad (2.1)$$

$$\text{Čia } K_P = K_C, K_I = K_C / \tau_I \quad \text{ir} \quad K_D = K_C \tau_D$$

Tada Zieglerio – Nicholso uždaros sistemos reguliatoriai derinami dviem žingniais:

- 1) Pirmame žingsnyje naudojama tik P dedamoji. Vertė didinama tol, kol proceso išėjime atsiranda pastovūs svyravimai. Jei toliau padidintume integruojančią vertę, sistema taptų nestabili [4].
- 2) Stiprinimo vertė, kai valdiklis pradeda generuoti pastovius proceso svyravimus, vadinamas kritiniu stiprinimu K_u . Laiko tarpas tarp svyravimų amplitudinių verčių yra vadinamas kritiniu periodu P_u .

Suradus K_u ir P_u vertes, kitas reikšmes galima išsiskaičiuoti iš **2.1 lentelės**.

2.1 lentelė Zieglerio – Nicholso derinimo parametrai

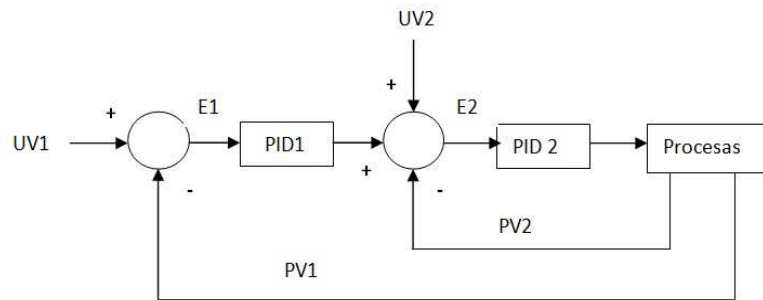
Regulatorius	K_C	τ_I	τ_D
P	$0,5K_u$	-	-
PI	$0,45K_u$	$P_u/1,2$	-
PID	$0,6K_u$	$P_u/2$	$P_u/8,0$

Tačiau dėl didesnio fazės vėlavimo procesuose su vėlinimo elementais, prastėja uždarojo kontūro reguliavimo sistemų stabilumas. Norint užtikrinti reikiamą stabilumą, reikia mažinti reguliatorių stiprinimą. Dėl to uždarojo kontūro sistemos reakcija į išėjimo nuokrypius tampa lėtesne, lyginant su analogiška sistema be vėlavimo. Taigi, nors įprastiniai reguliatoriai ir gali būti naudojami sistemose su vėlavimu, paprastai reikia mažinti sistemos reakcijos greitį, siekiant užtikrinti uždarojo kontūro stabilumą [5].

Reikia pažymėti, kad valdant procesus su vėlavimu diferencialinė reguliavimo dėsnio dedamoji yra naudinga, tačiau valdant procesus, kuriuose dominuoja grynasis (transportinis) vėlavimas, PID reguliavimo dėsnio reguliatoriai dažnai nėra pranašesni už PI reguliatorius, nes diferencialinė valdančiojo poveikio dedamoji dėl neefektyvaus prognozavimo tiesiškai ekstrapoliuojant išėjimą yra nenaudinga.

Kaskadinis PID reguliatorius yra tinkamas šiai sistemai, nes koncentracijos ir tūrio priklausomybės kinta netolygiai, t.y. skiriasi jų laiko pastoviosios T . Druskos tirpalo koncentracijos laiko pastovioji T_{HCL} yra 30 s, o tūrio kitimo laiko pastovioji T_V yra 38 s. Žinoma, taip pat skiriasi ir matuojamos terpės: druskos koncentracija ir tūris (masė). Todėl tai atskiros valdymo grandinės, atskiri jutikliai. Valdymo uždavinys susiveda į vieną bendrą kompleksinį sprendinį. Kaskadinėse sistemose išoriniu reguliatoriumi būna lėtesnį procesą valdantis (nagrinėjamu atveju tūrio kitimo laiko pastovioji T_V yra lėtesnė). Šis reguliatorius dažnai vadinamas valdomuoju, į jį ateina valdymo signalas iš greitesnio proceso signalo, grįžtamojo ryšio signalas iš proceso.

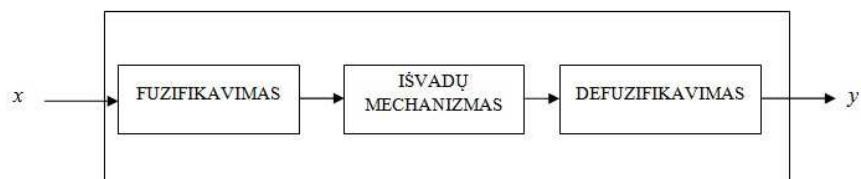
Bendru atveju valdymo sistema turėtų atrodyti taip:



2.2 pav. Blokinė kaskadinio PID regulatoriaus schema

Čia UV1 ir UV2 užduotos vertės (koncentracijos ir tūrio). E1 ir E2 valdymo paklaidos, o PV1 ir PV2 esamos proceso vertės.

Kitas valdymo variantas tai „fuzzy“ reguliatorius. Šis reguliatorius puikiai tinka empirinėms valdymo sistemoms. Fuzzy sistemų gali būti įvairių tipų. Pavyzdžiui, plačiai naudojamas reguliatorius su keleta įėjimų ir išėjimų (angl. *multi-input multi-output*, *MIMO*). Taip pat galima aprašyti ir reguliatorius su keliais įėjimais, bet vienu išėjimu. Tada sistema vadinama *MISO* (angl. *multi-input single-output*) [6]. Nagrinėjamu atveju fuzzy idealiai tinka, nes galima apibrėžti fuzifikavimo taisyklės dviems skirtingiems kontūrams. Pavyzdžiui, nagrinėjamai sistemai fuzifikavimo taisyklės galėtų būti šios:



2.3 pav. Fuzzy regulatoriaus sintezė

Fuzifikavimo proceso metu fizinės sistemos vertės (temperatūra, pagreitis, įtampa ir t.t.) verčiamos į fuzzy įėjimų rinkinius, kad iš jų būtų daromos valdymo išvados. Išvadų darymo mechanizmas naudoja taisykles iš taisyklių bazės, kad pagal jas formuotų išėjimų rinkinius. Tai vadinama defuzifikavimu. Fuzzy regulatoriaus taisyklės formuojamos sąlygos sakiniiais: „jei *SĄLYGA 1* ir/arba *SĄLYGA 2* tada *IŠĖJIMAS 3*“. Čia *SĄLYGA 1*, *SĄLYGA 2* ir *IŠĖJIMAS 3* yra įėjimų ir išėjimų rinkiniai.

2.2 Impulso pločio moduliacijos taikymas

Svarbus aspektas yra tas, kad pavarą (sklėdė) dirba tik ON-OFF režimu. Tai reiškia, kad regulatoriaus valdymo signalas turi būti paverčiamas į nuoseklią įjungtos ir išjungtos pozicijų seką. Tokiais atvejais valdymo praktikoje taikomas impulso pločio moduliacijos metodas.

Impulso pločio moduliacija (*angl.* Pulse Width Modulation) yra procesas, kuris keičia signalo impulso plotį, išlaikydamas dažnį/periodą pastovų. Taip gaunamas signalas, kuris gali būti keičiamas į įjungtą būseną ilgiau ar trumpiau, nei išjungta būseną. Kai tokio tipo moduliacija generuoja impulsus, tai sakoma, kad užimtumo ciklas (*angl.* duty cycle) yra reguliuojamas. Kitaip žinant – impulso pločio laiko ir periodo santykis yra užimtumo ciklas. Šis santykis valdymo blokuose ir įvairiuose programiniuose paketuose yra realizuojamas kaip procentinis santykis. Tada regulatoriaus sugeneruojamas valdymo signalas per impulso pločio moduliacijos bloką verčiamas į impulsų seką. Svarbiausias impulso pločio moduliacijos parametras yra jos periodas T_{PWM} . Teoriškai ši vertė turėtų būti kaip įmanoma mažesnė [7]. Vis dėlto, praktikoje T_{PWM} yra apribotas vožtuvo (pavaros) reakcijos laiku T_V . Taigi, periodas privalo būti didesnis už pavaros reakcijos laiką, kitu atveju vožtuvas gauna pastovų signalą. Praktikoje, dėl valdymo signalo triukšmų yra įvesta toleruotina paklaida d_{min} . Šios paklaidos įvedimas išlaiko pastovų valdymo signalą ir sumažina nereikalingą vožtuvo atsidarinėjimą [8]. Paklaidos, periodo ir minimalios reakcijos priklausomybės išreiškiamos formule:

$$d_{min} = \frac{T_V}{T_{PWM}} * 100\% \quad (2.2)$$

Tada maksimalus valdymo signalas iš regulatoriaus, išreikštas procentais yra:

$$u_{max} = 100\% - d_{min} \quad (2.3)$$

Pagrindinis impulso pločio moduliacijos taikymo diskretingiems vožtuvams minusas yra greitas vožtuvų mechaninis nusidėvėjimas. Todėl labai svarbu paskaičiuoti tinkamą periodą ir leistiną paklaidą, kad būtų galima prailginti vožtuvo tarnavimo laiką [9].

2.3 Procesų modeliavimo metodika

Procesų modeliavimas yra fizinių procesų pakeitimas matematinių lygčių rinkiniu. Modeliavimas yra būtinas efektyviai procesų analizei ir efektyviai veikiančių procesų valdymo sistemų sintezei.

Efektyvių valdiklių projektavimas labai supaprastėja, jei gerai suprantama valdomų procesų dinamika. Šis supratimas susijęs su adekvataus proceso modelio sudarymu, o proceso modeliai geriausiai aprašomi matematine kalba. Galima teigti, kad pirmasis žingsnis analizuojant ir projektuojant valdymo sistemas yra sudaryti tinkamą matematinį modelį. Matematinis modelis iš principo yra įvairių fizinės sistemos elgseną charakterizuojančių matematinių ryšių kintamųjų rinkinys. Pagrindinė matematinio modelio nauda yra ta, kad tai patogus fizinės sistemos pakaitalas, kuriuo galima greitai, be papildomų sąnaudų eksperimentams ištirti sistemos reakcijas į įvairius įėjimo kintamųjų pasikeitimus [10]. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, kad reali fizinė sistema arba procesas skiriasi nuo matematinio aprašo, vadinamo proceso matematiniu modeliu. Proceso modelis geriausiu atveju tik atspindi esmines proceso savybes ir niekada negali būti pasitelktas kaip tikslus fizinės sistemos ekvivalentas. Vis dėlto, matematinis procesų aprašas suteikia daug informacijos, leidžia juos nuodugniai ištirti ir charakterizuoti.

Yra keletas skirtingų būdų ir taisyklių procesams matematiškai aprašyti. Populiariausi yra šie:

1) Tiesinės ir netiesinės sistemos

Sistemos, aprašomos tiesinėmis lygtimis, vadinamos tiesinėmis. Kaip žinoma, dauguma realių technologinių procesų daugiau ar mažiau yra netiesiniai. Pasirodo, kad kai kuriuos netiesinius procesus galima efektyviai aproksimuoti tiesinėmis lygtimis. Tais atvejais sistemos klasifikuojamos kaip tiesinės. Labai griežtos tiesinių ir netiesinių sistemų ribos realiuose procesuose nėra.

2) Sutelktųjų parametrų sistemos

Yra žinoma nemažai procesų (tiesinių ar netiesinių), kurių priklausomi kintamieji gali būti imami kaip tapatūs (bendri) visai sistemai. Jie keičiasi tik laiko atžvilgiu. Tokių sistemų teoriniai modeliai aprašomi paprastomis diferencialinėmis lygtimis. Laikas yra vienintelis nepriklausomas tokiose lygtyse kintamasis.

Tokie procesai yra priskiriami prie sutelktųjų parametrų sistemų, nes visų kintamųjų kitimas sutelktai priklauso nuo laiko. Diferencialinės lygties ar lygčių sistemos, apibūdinančios apibendrintų parametrų sistemos dinamiką, eilė yra naudojama tolesnei klasifikacijai. Procesas, aprašomas pirmosios eilės diferencialine lygtimi, vadinamas pirmos eilės sistema. *n-tosios* eilės sistema yra procesas, aprašomas *n-tosios* eilės diferencialine lygtimi arba lygčių sistema, kuri sudaryta iš *n* pirmosios eilės diferencialinių lygčių.

3) Paskirstytųjų parametrų sistemos

Kai sistemos viduje vykstantis procesas keičiasi nuo vieno erdvės taško iki kito, kartu dar papildomai keisdamasis laiko atžvilgiu, tai tokios sistemos esminis matematinis aprašas įgyja dalinės diferencialinės lygties formą. Šis matematinis aparatas reikalingas įvertinti „erdvinį“ proceso vyksmą, o tokie procesai dar vadinami paskirstytųjų parametrų procesais (sistemomis). Šiuo atveju turime daugiau proceso nepriklausomųjų kintamųjų ir proceso vyksmas tarp jų „pasiskirsto“.

4) Diskretinio laiko sistemos

Nepaisant to, kad proceso kintamieji paprastai nekinta „šuoliais“ ir jų pasikeitimai yra tolydinės laiko (ir padėties funkcijos), gana įprastos yra situacijos, kai išėjimo kintamieji yra matuojami ne pastoviai, o tik tam tikrais diskretiniais laiko momentais. Šiuo atveju procesui valdyti naudojamos diskretiškai laiko atžvilgiu kintančios kintamųjų reikšmės. Tokios sistemos yra modeliuojamos skirtuminėmis lygtimis ir vadinamos diskretinio laiko sistemomis.

Iš esmės visi teoriniai modeliai remiasi bendruoju tvermės principu. Šį principą galime aprašyti tokia lygtimi:

$$Kaupimas = įėjimas - išėjimas + vidinė gamyba \quad (2.4)$$

Dažnai tvermės principą patogiau išreikšti kaupimo kitimu. Šiuo atveju:

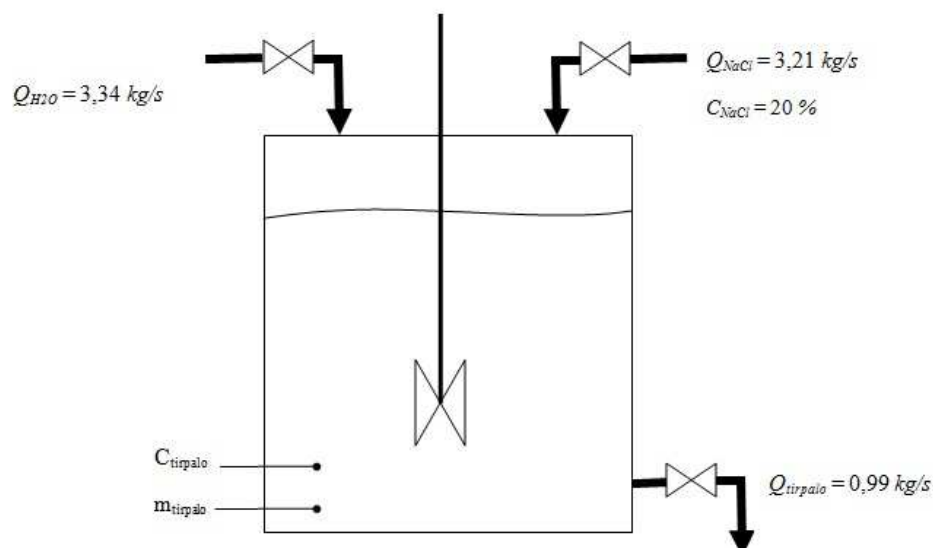
$$Kaupimo kitimas = įėjimo kitimas - išėjimo kitimas + gamybos kitimas \quad (2.5)$$

Nepaisant technologinių procesų įvairovės, pagrindinės kiekybės, kurios yra kaupiamos šių procesų metu, yra arba masė arba momentas, arba energija, arba jų visų derinys. Taigi, tvermės principas, ypač kalbant apie masės, energijos ir momento tvermę, nustato pagrindinį „karkasą“ modeliams sudaryti [10].

3.1.1 Matematinis talpos modelis

Norint esamai sistemai pritaikyti valdymo dėsni, visų pirma reikia sukurti sistemos matematinį modelį, o tik tada modeliuojant gauti optimalius reguliatorių parametrus. Matematinis modelis kuriamas aprašant procesą diferencialinėmis lygtimis. Norint tiksliai aprašyti sistemą, būtina įvertinti ne tik procesus vykstančius talpoje, bet ir išorinius trikdžius.

Nagrinėjamu atveju maišymo talpoje maišomi įtekantys agentai: vanduo ir procentinės koncentracijos druskos tirpalas (**3.1 pav.**). Agentai įleidžiami atidarius vožtuvus A ir B. Talpoje nuolat fiksuojamas tirpalo koncentracijos ir tūrio (masės) lygis. Tam naudojami jutikliai: konduktometras ir svorio celės. Talpos išėjime sumontuotas vožtuvas C, kuris atsidarinėdamas išleidžia tirpalą. Tirpalo išleidimo dažnis ir laikas priklauso nuo gamybos apkrovų ir yra nevaldomas. Todėl matematiniam modelyje jis gali būti vertinamas kaip trikdys. Talpoje būtina palaikyti užduotą koncentraciją C_{norm} ir užduotą tūrį (masę) M_{norm} .



3.1 pav. Sūrimo tirpalo maišymo talpa

3.1.2 Proceso kintamieji ir trikdžiai

Tirpalo gaminimo proceso būseną charakterizuoja kintamieji $C_{tirpalo}$ ir $m_{tirpalo}$ (3.1 lentelė), kurie yra stebimi jutiklių pagalba. Procesas valdomas įėjimais Q_{H_2O} , Q_{NaCl} ir $Q_{tirpalo}$ (3.2 lentelė).

3.1 lentelė Proceso būsenos kintamieji

Kintamasis	Aprašymas	Kitimo ribos
Tirpalo koncentracija $C_{tirpalo}$ X(2)	Vandens ir koncentrato mišinys	0-20%
Tirpalo masė $m_{tirpalo}$ X(1)	Bendra maišomo tirpalo masė	0-1000 kg

3.2 lentelė Proceso įėjimai

Įėjimas	Aprašymas	Galimos vertės
Q_{H_2O} U(1)	Įleidžiamo vandens masės srautas	0 arba 3,34 kg/s
Q_{NaCl} U(2)	Įleidžiamo koncentrato masės srautas	0 arba 3,21 kg/s
$Q_{tirpalo}$ U(3)	Išleidžiamo tirpalo masės srautas	0 arba 0,99 kg/s

Trikdys gali atsirasti talpos išleidime B, pvz. kai pakinta (padidėja ar sumažėja) gamybos resursai ir reikiamas didesnis ir mažesnis tirpalo kiekis.

3.1.3 Proceso modelio lygtys ir prielaidos

Tirpalo koncentracijos kitimo greitis priklauso nuo įleidžiamos vandens masės srauto ir paduodamo koncentrato masės srauto, bei nuo maišymo talpos dydžio (tirpalo talpoje masės). Priimta, kad koncentratas ir vanduo talpoje maišosi tolygiai ir koncentracija visoje talpoje yra vienoda .

Tirpalo masė priklauso nuo įleidžiamo vandens A, koncentrato B ir išleidžiamo tirpalo masės (kiekio) C. Žinant šias priklausomybes, galima sudaryti procesą aprašančias diferencialines lygtis.

Tirpalo esančio talpoje masės balansas:

$$\frac{dm_{tirpalo}}{dt} = Q_{H_2O} + Q_{NaCl} - Q_{tirpalo} \quad (3.1)$$

Q – paduodami /nuvedami masių srautai [kg/s];

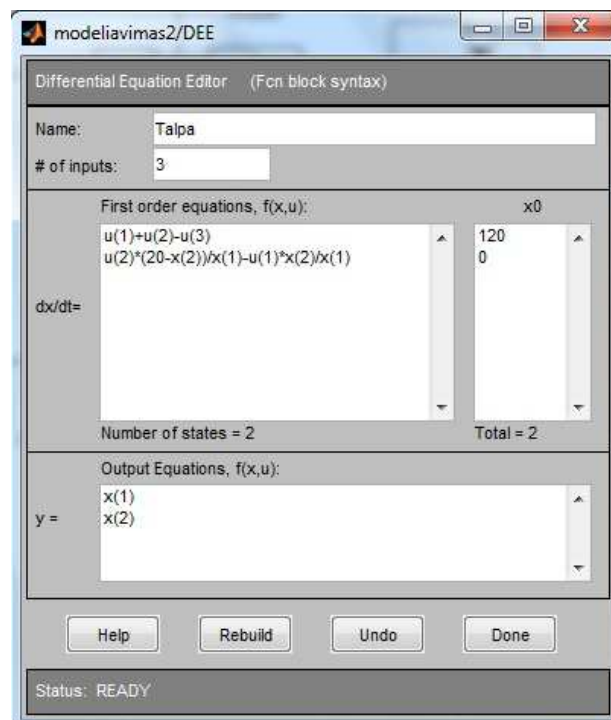
Tirpalo procentinės koncentracijos talpoje lygtis:

$$\frac{d C_{tirpalo}}{dt} = \frac{Q_{NaCl}}{m_{tirpalo}} * (20 - C_{tirpalo}) - \frac{Q_{H_2O}}{m_{tirpalo}} * C_{tirpalo} \quad (3.2)$$

$C_{tirpalo}$ – procentinė koncentracija.

Sistemai modeliuoti reikia užsiduoti pradines tirpalo masės $m_{tirpalo}(0)$ ir tirpalo koncentracijos reikšmės $C_{tirpalo}(0)$ reikšmes. Pradinės modelio reikšmės parinktos tos, kurios dažniausiai ir būna realioje sistemoje. Taigi, $m_{tirpalo}(0) = 120 \text{ kg}$, $C_{tirpalo}(0) = 0\%$. Užduotos vertės $M_{norm} = 400 \text{ kg}$ ir $C_{norm} = 8\%$.

Modeliavimui naudotas mokslinis – inžinerinis paketas „Matlab Simulink“. Pirmiausiai, atsižvelgiant į lygtis 3.1 ir 3.2, DDE bloko pagalba sumodeliuotas procesas talpoje (3.2 pav.). Nurodyti įėjimo kintamieji $U(1)$, $U(2)$, $U(3)$ yra analogiški paduodamiems masių įėjimams M_{H_2O} , M_{NaCl} , $M_{tirpalo}$. Išėjimai (proceso vertės) $X(1)$ ir $X(2)$ yra stebima tirpalo masė $m_{tirpalo}$ ir tirpalo koncentracija $C_{tirpalo}$.



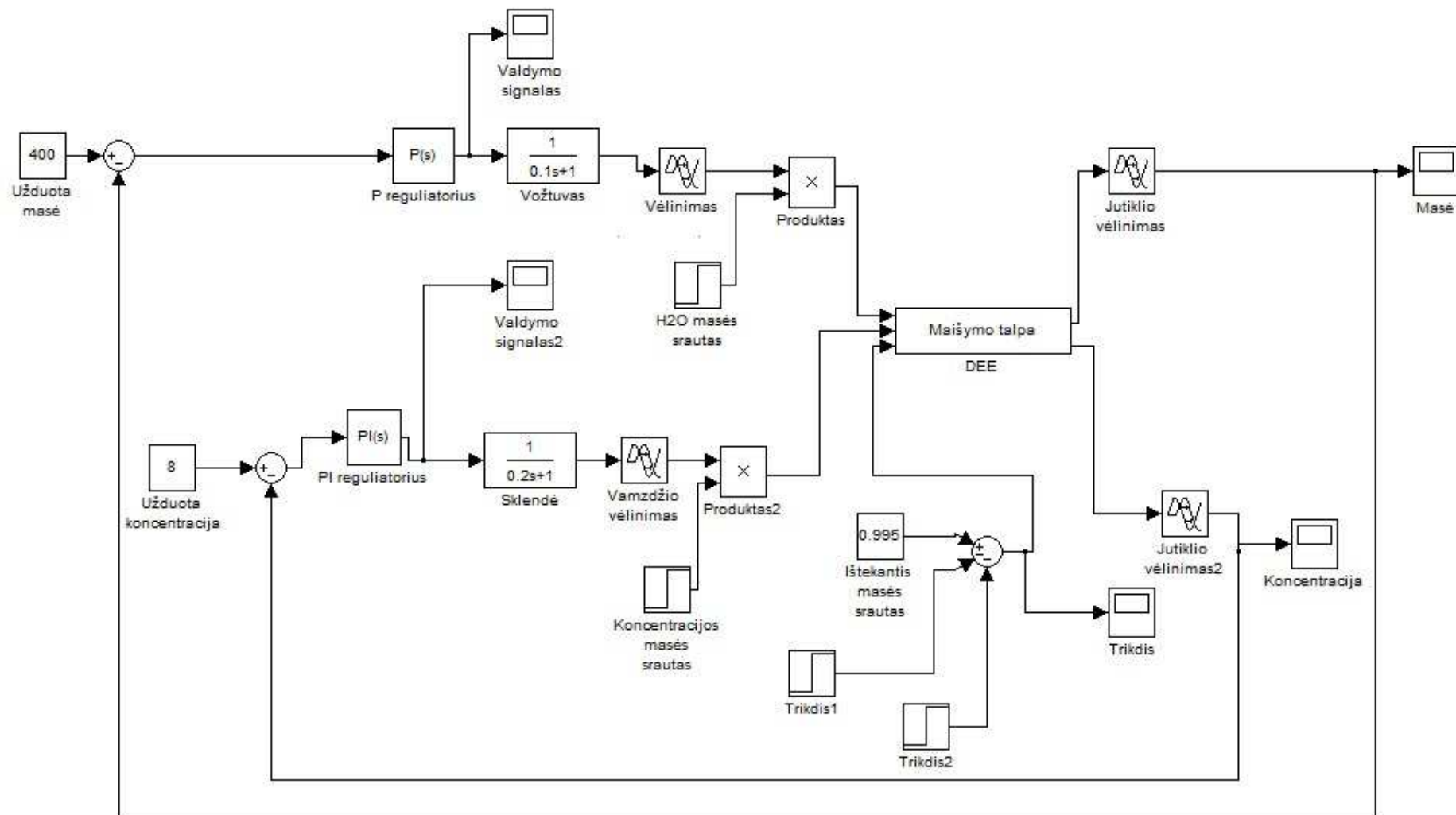
3.2 pav. DDE talpos matematinis modelis

3.2 Matematinis modeliavimas su P ir PI reguliatoriais

Valdymo sprendimas realizuotas su dviem klasikiniiais P ir PI reguliatoriais su grįžtamuju ryšiu. Vienas iš reguliatorių skirtas užduotai koncentracijai palaikyti, o kitas - masei, bet abiejų reguliatorių valdomų vykdyklių poveikis yra tiesiogai susijęs – kintant paduodamo vandens kiekiui keičiasi masė ir koncentracija. Analogiškai – kintant paduodamo koncentrato srautui, kinta bendra masė ir koncentracija. Taigi, nors reguliatorių valdymo kontūrai ir atskiri, bet vykdyklių poveikis turi įtakos abiejų reguliatorių grįžtamojo ryšio parametrų.

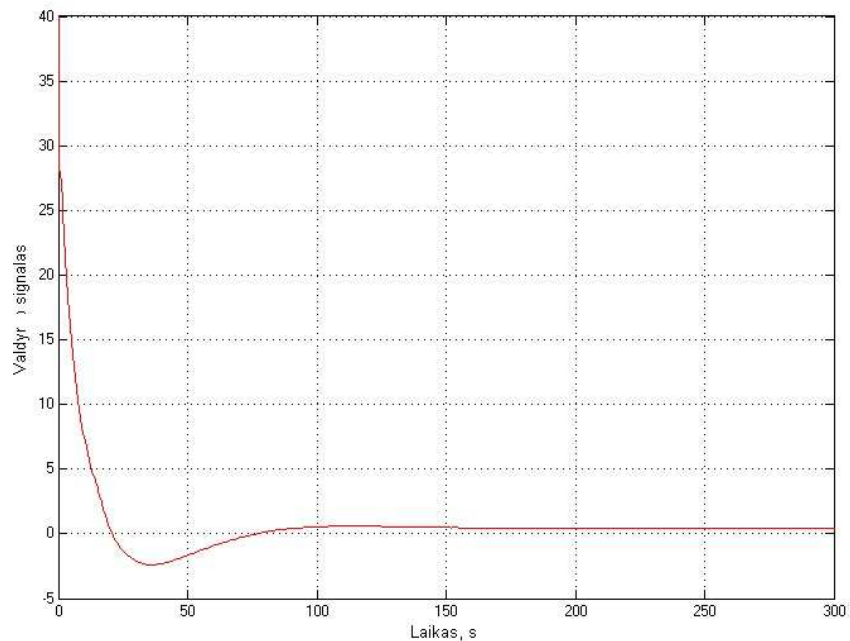
Reguliatorių derinimas vyko atsižvelgiant į literatūros apžvalgos skyriuje aprašyto Zieglerio – Nicholso derinimo metodą. Geriausių modeliajuomos sistemos reguliatorių parametrų poveikis pavaizduotas paveiksluose **3.6-3.7 pav.** Geriausia valdymo kontūro užduotai masei palaikyti P reguliatoriaus proporcinė dedamoji $K_p=0.1$. Vandens vožtuvo reguliatorius P stiprinimo dedamoji yra mažos vertės, nes didelis stiprinimas įneštų į sistemą švytavimus, kadangi vandens vožtuvo vėlinimas vos 0,1 s. PI reguliatorius valdo koncentrato sklendę. Jo parametrai tokie: $K_p=0.47$, o $K_i=0.001$. Kadangi procesas yra su dideliu transportiniu vėlinimu (vamzdžiu koncentratas atiteka vos po 14,5 s), tai trečia – diferencijuojanti PID reguliatoriaus dedamoji yra praktiškai negalima, nes tokiu atveju ji išvestų koncentraciją iš nusistovėjusios būsenos į nestabilią. Stiprinimo dedamosios K_p vertė taip pat nedidelė, nes kaip jau minėta, jautikliai apie sklendės poveikį „sužino“ po vėlinimo $T=14,5$ s.

Modeliuojamoje sistemoje ištekančio srauto $M_{tirpalo}$ modeliuojamas be pertraukimų. Srauto pertraukimai gali būti modeliuojami kaip sistemos trikdžiai. Druskos tirpalo jautiklis turi sisteminį 3,2 s vėlinimą, svėrimo celės modeliujamos su 0,1 s jutikliniu vėlinimu.

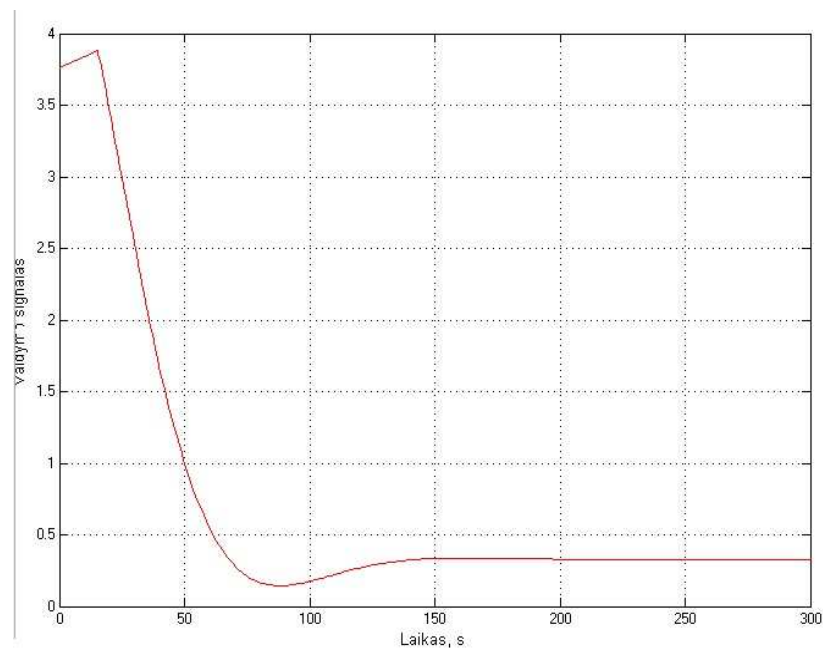


3.3 pav. Matlab „Simulink“ modelio schema su P ir PI reguliatoriai

Sumodeliavus sistemą, gauti PI ir P reguliatorių sugeneruoti valdymo signalai bei proceso koncentracijos ir masės kitimo kreivės. Valdymo signalų kreivės pavaizduotos paveikslėliuose **3.4 pav.** ir **3.5 pav.** Kaip matyti iš grafikų, reguliatorių išėjimai yra be švytavimų, tolydūs ir nusistovintys. Taigi, vožtuvas ir sklendė neturėtų „šokinėti“ ir išvesti procesą į nestabilią būseną.

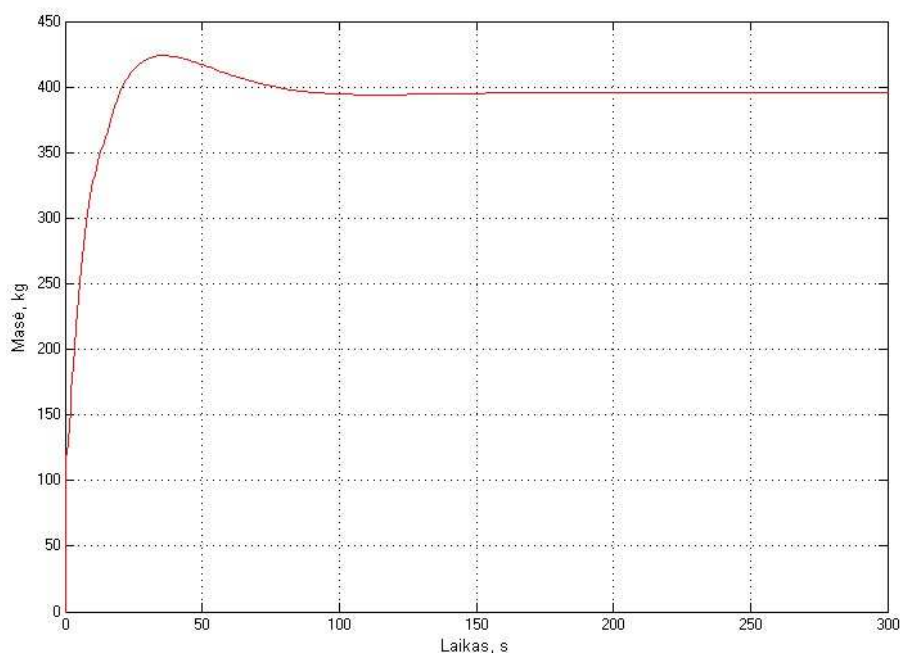


3.4 pav. P reguliatoriaus valdymo signalas vandens vožtuvui



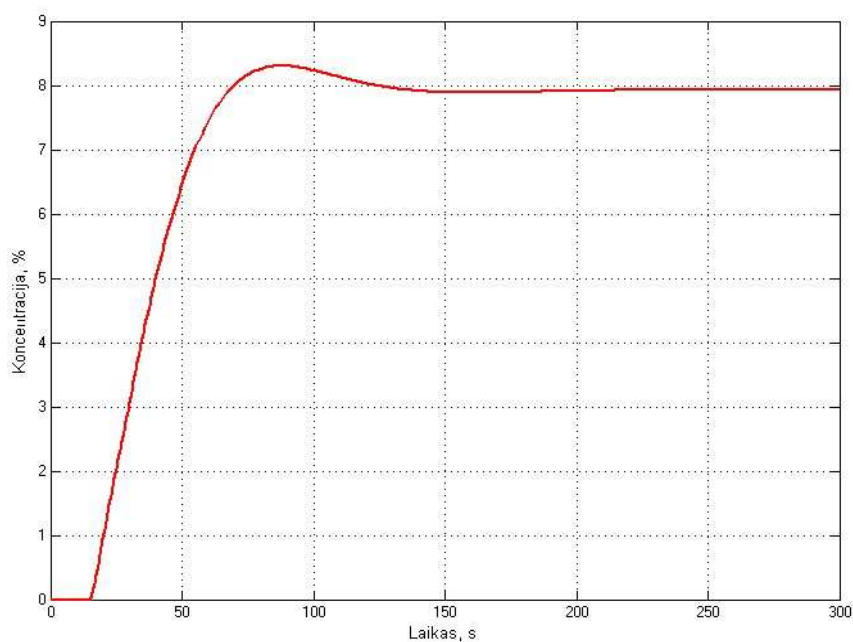
3.5 pav. PI reguliatoriaus valdymo signalas koncentrato sklendei

Bendra sumodeliuota tirpalo masė pavaizduota **3.6 pav.** Kaip matyti iš grafiko, sistema nusistovi be svyravimų ar didelių perreguliavimų.



3.6 pav. Masės kitimas laike

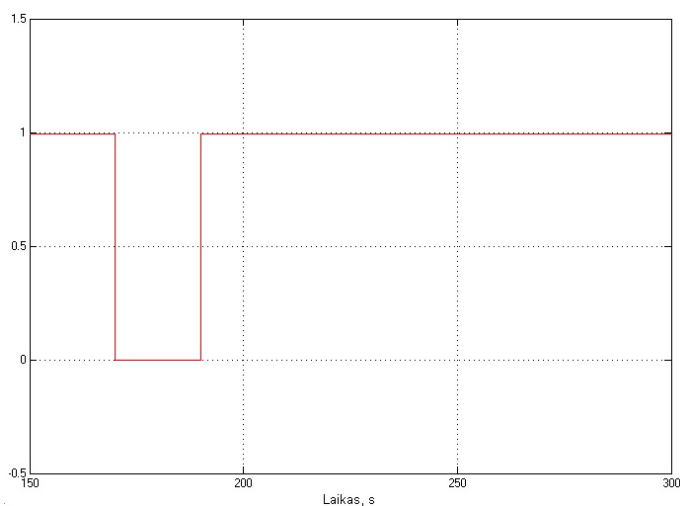
Nusistovėjusi statinė masės paklaida yra apie 1,25 %, o perreguliavimas 5,5 %. Nusistovėjimo laikas – 150 s. Koncentracijos rezultatai geresni, grafikas pavaizduotas **3.7 pav.**



3.7 pav. Koncentracijos kitimas laike

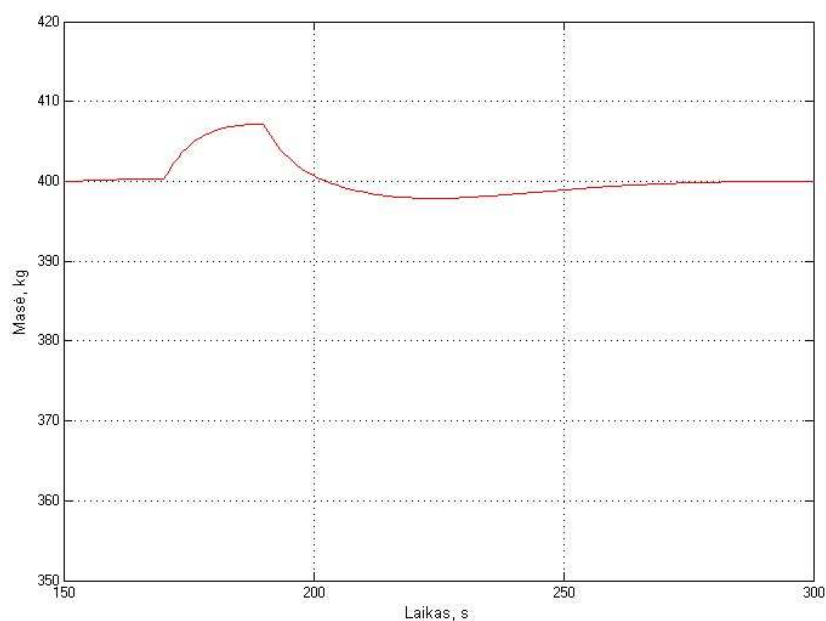
Nusistovėjusi koncentracijos statinė paklaida 0,63 %, perreguliavimas - 5%.
Koncentracija nusistovi ties 210 s riba.

Sistemos stabilumui ištirti į sistemą paduotas trikdys. Trikdys formuojamas kaip ištekėjimo srauto pertraukimas. Jau nusistovėjusiai sistemai, 170-tą s uždaromas ištekantčio tirpalo vožtuvas. Vožtuvas atidaromas po 20 s. Suformuotas trikdys pavaizduotas **3.8 pav.**



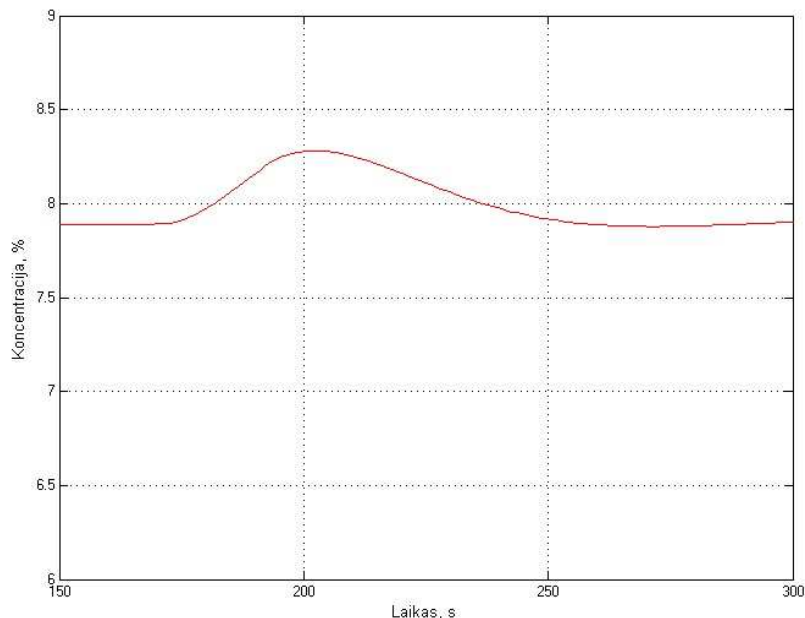
3.8 pav. Ištekantčio srauto pertraukimas

Toks trikdys įmanomas, kai dėl tam tikrų gamybinių priežasčių nutraukiamas tirpalo dozavimas į brandinimo talpas. Kaip matyti iš masės reakcijos grafiko į trikdį (**3.9 pav.**), 170-tą s yra nežymus – 2% šuoliukas, kuris 260-tą s nusistovi.



3.9 pav. Sistemos masės reakcija į trikdį

Koncentracijai toks trikdys turėtų daugiau įtakos. Iš **3.10 pav.** grafiko matyti, kad trikdys perreguliuoja koncentraciją. Šuoliukas siekia 3,8 % . Sistemos koncentracija vėl nusistovi dingus trikdžiui.



3.10 pav. Sistemos koncentracijos reakcija į trikdį

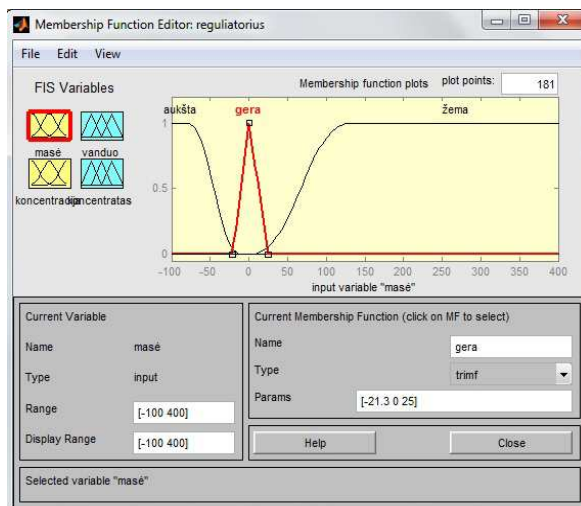
Kaip matyti iš sumodeliuotų grafikų, kompleksinė P ir PI reguliatorių sistema generuoja neblogus valdymo rezultatus, yra stabili padavus trikdį. Sistema su rasta parametrais turėtų būti patikrinta eksperimentiškai.

3.3 Matematinis modeliavimas su Fuzzy reguliatoriumi

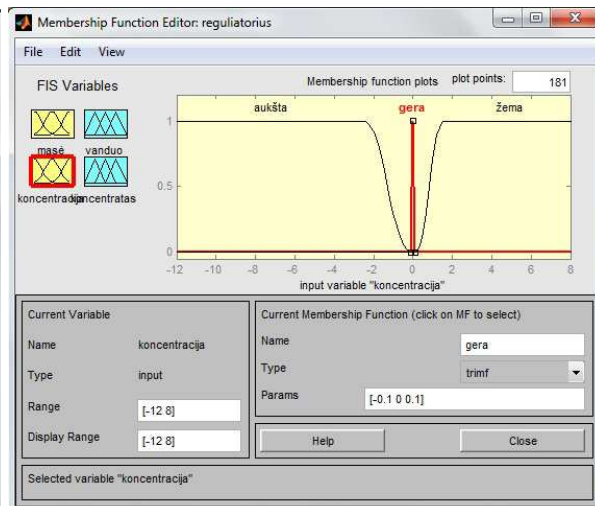
Esamai sistemai taip pat tirtas ir neraiškių aibių logikos reguliatoriaus taikymas. Modelio struktūra tokia pati kaip ir prieš tai aprašyto PI ir P reguliatorių sistemos, tik vietoje dviejų reguliatorių turime vieną. Reguliatoriaus turi du įėjimus ir išėjimus. Įėjimai – tai masės ir koncentracijos vertės. Išėjimai – tai valdymo signalai vožtuvui ir sklendei. Įėjimo rinkiniai sudaryti iš 3 aibių: „aukštos“ paklaidos, „geros“ ir „žemos“ paklaidos. Tokie patys ir išėjimų rinkiniai: „uždaras“, „pusiau atviras“ ir „atviras“. Rinkinių ribos pavaizduotos paveiksluose **3.12-3.15 pav.**

Regulatoriaus taisyklės realizuotos su sąlygos struktūra: „*JEIGU SĄLYGA-1 ir SĄLYGA-2 tai POVEIKIS-1 ir POVEIKIS-2*“. Realizuotos taisyklės duomenų bazėje šios:

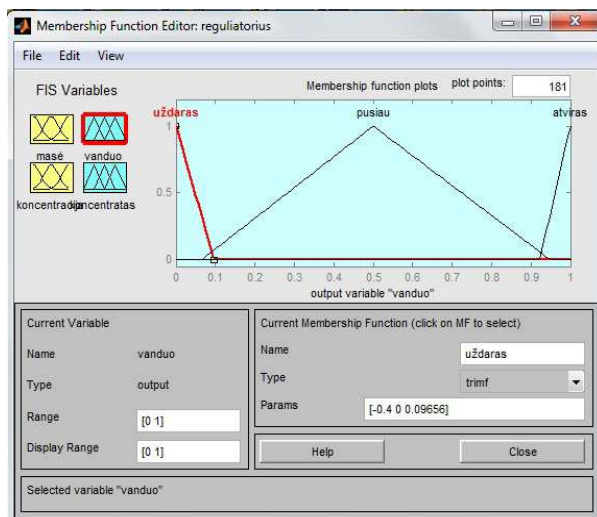
- 1) Jei *masė žema* ir *koncentracija žema* tai *vanduo atviras* ir *koncentratas uždaras*
- 2) Jei *masė žema* ir *koncentracija gera* tai *vanduo pusiau atviras* ir *koncentratas uždaras*
- 3) Jei *masė žema* ir *koncentracija aukšta* tai *vanduo atviras* ir *koncentratas uždaras*
- 4) Jei *masė gera* ir *koncentracija žema* tai *vanduo uždaras* ir *koncentratas pusiau atviras*
- 5) Jei *masė gera* ir *koncentracija gera* tai *vanduo uždaras* ir *koncentratas uždaras*
- 6) Jei *masė gera* ir *koncentracija aukšta* tai *vanduo pusiau atviras* ir *koncentratas uždaras*
- 7) Jei *masė aukšta* ir *koncentracija žema* tai *vanduo uždaras* ir *koncentratas pusiau atviras*
- 8) Jei *masė aukšta* ir *koncentracija gera* tai *vanduo uždaras* ir *koncentratas uždaras*
- 9) Jei *masė aukšta* ir *koncentracija aukšta* tai *vanduo pusiau atviras* ir *koncentratas uždaras*



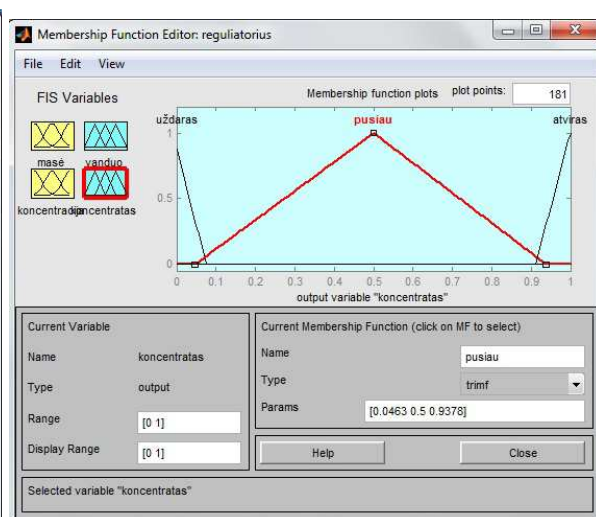
3.12 pav. Masės įėjimo rinkinių rinkinių



3.13 pav. Koncentracijos įėjimo rinkinių ribos



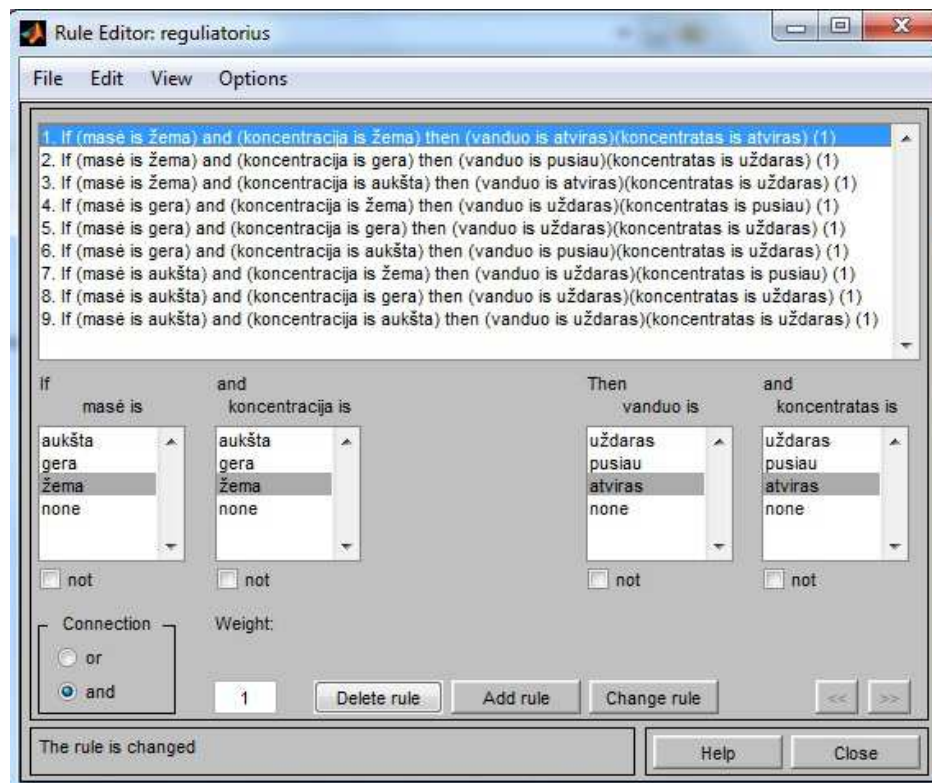
3.14 pav. Vandens vožtuvo išėjimo rinkinių ribos



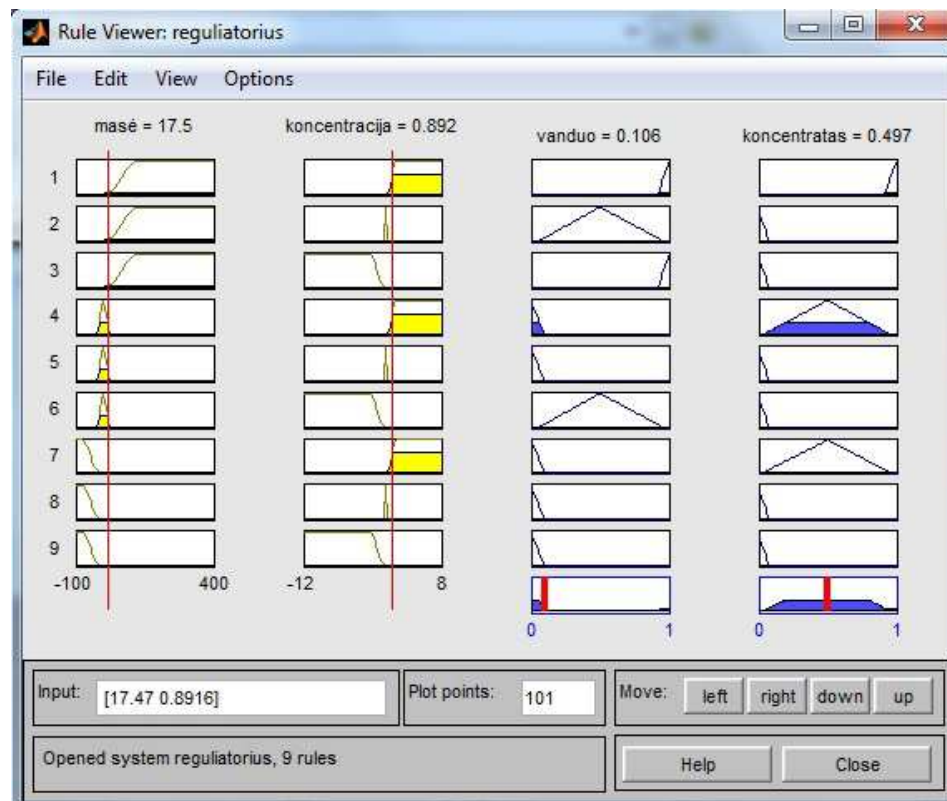
3.15 pav. Koncentrato sklendės išėjimo rinkinių ribos

Kaip matyti iš tūrio įėjimų rinkinių, toleruojama nusistovėjusios vertės paklaida yra 5%. Tuo tarpu koncentracija priimama kaip „gera“, kai patenka į rinkinį su nedidesne kaip 0,1 % paklaida.

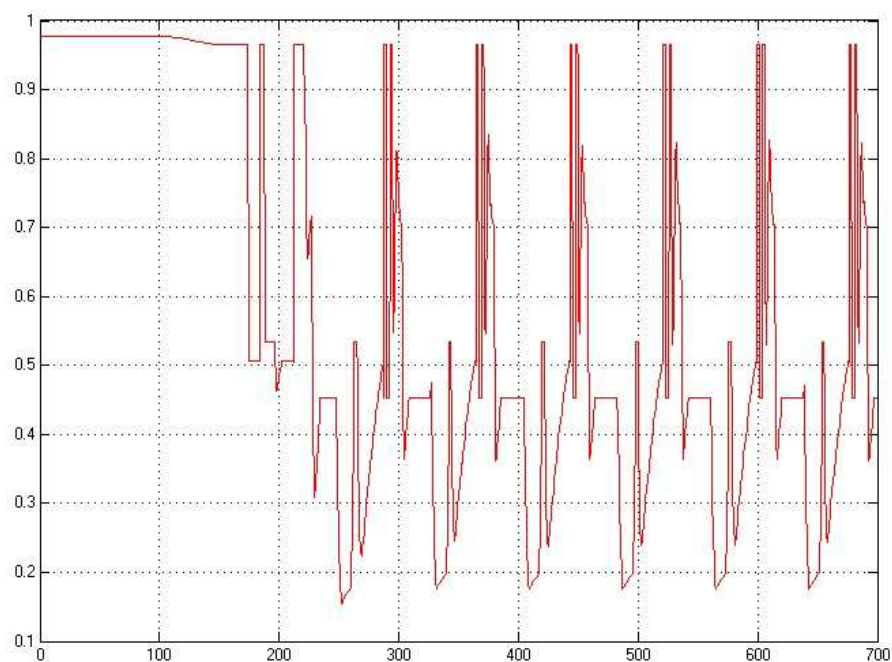
Regulatoriaus derinimas vyko eksperimentiškai, stebint išėjimo kintamųjų rezultatus. Modeliuojant keistos įėjimo ir išėjimo rinkinių ribos, jas praplečiant ar siaurinant. Kaip pastebėta, geresni rezultatai gaunami, kai koncentracijos paklaida leidžiama didesnė nei 0,1% . Deja, didesnė toleruojama paklaida prieštarautų technologiniams reikalavimams ir užsibrėžtiems darbo tikslams. Toliau pavaizduoti geriausi valdymo rezultatai.



3.16 pav. Fuzzy reguliatoriaus taisyklės

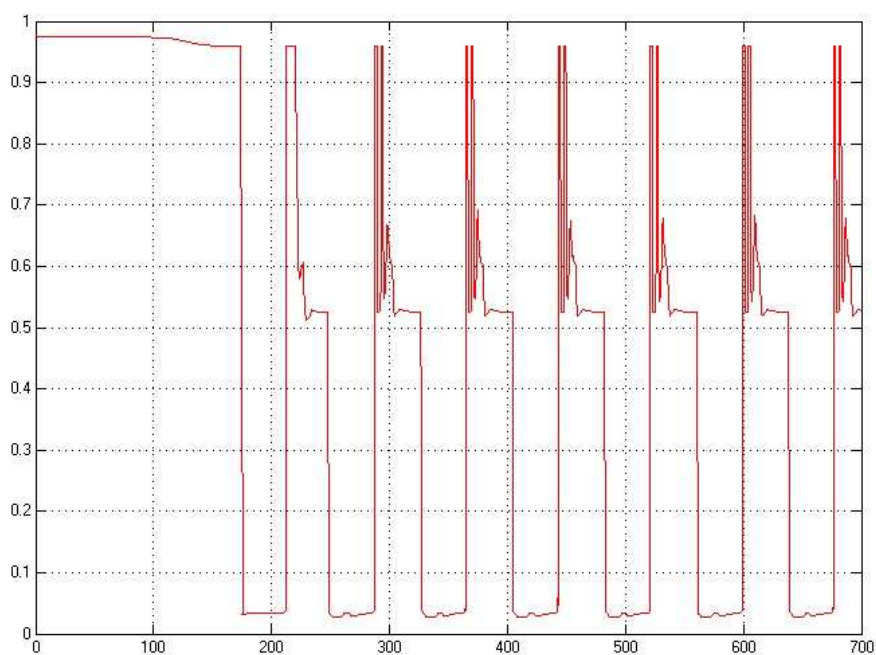


3.17 pav. Reguliatoriaus grafinės taisyklės



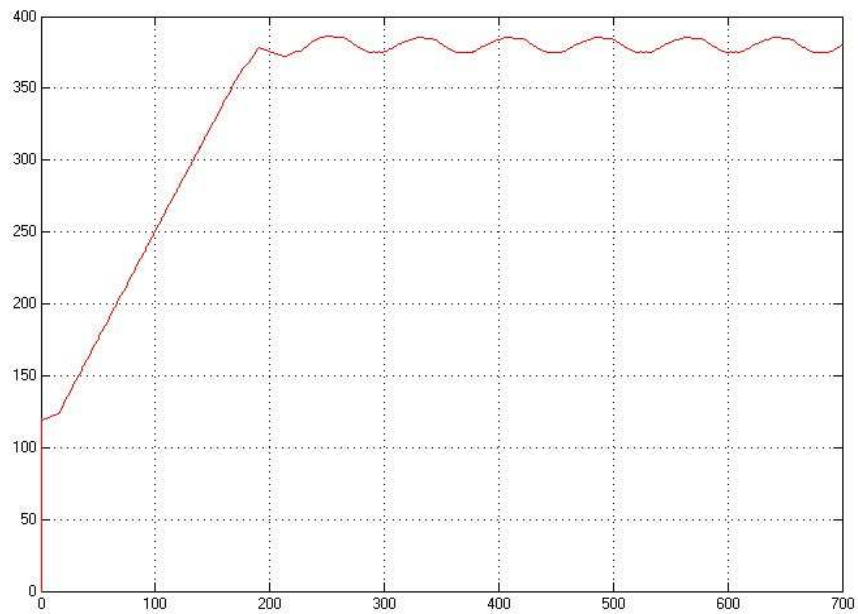
3.18 pav. Valdymo signalas vandens vožtuvui

Kaip matyti iš grafiko, valdymo signalas vandens vožtuvui yra „šokinėjantis“, netolydus. Trumpiausias periodas tarp dviejų amplitudinių šuoliukų siekia 0,2 s. Analogiška situacija ir su koncentracijos signalu pneumatinių sklendių **3.19 pav.** Čia trumpiausias periodas tarp dviejų „keterų“ yra 0,3 s. Tai yra pakankamas laikas sklendes reaguoti į valdymo komandą.



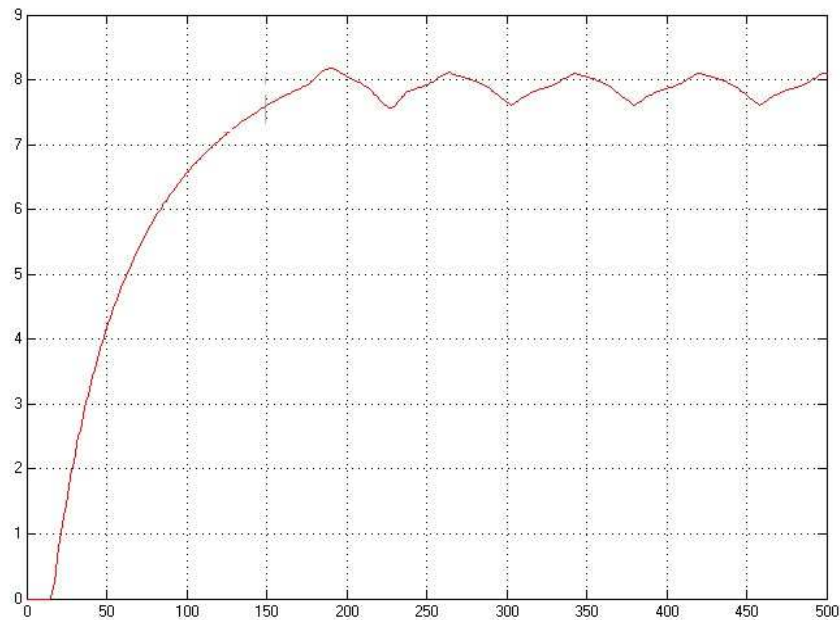
3.19 pav. Regulatoriaus valdymo signalas koncentracijos sklendei

Gauti masės ir koncentracijos rezultatų grafikai (3.20 pav. ir 3.21 pav.) byloja, kad sistemos nenusistovi, bet labiau primena ON-OFF tipo valdymą. Tai gali būti dėl per siauro koncentracijos jėjimų rinkinio bei dėl „griežtų“ fuzzy reguliatoriaus išėjimų rinkinio ribų.



3.20 pav. Fuzzy reguliatoriaus masės grafikas

Masės svyravimai sumodeliuoti 370-390 *kg* diapazone. Svyravimai prasideda 191-tą s.



3.21 pav. Fuzzy reguliatoriaus koncentracijos grafikas

Koncentracijos svyravimai sumodeliuoti 7,6 - 8,2 % koncentracijos diapazone. Svyravimai prasideda 185-tą s. Dėl negautos nusistovėjusios charakteristikos, Fuzzy reguliatorius eksperimentiškai netikrintas.

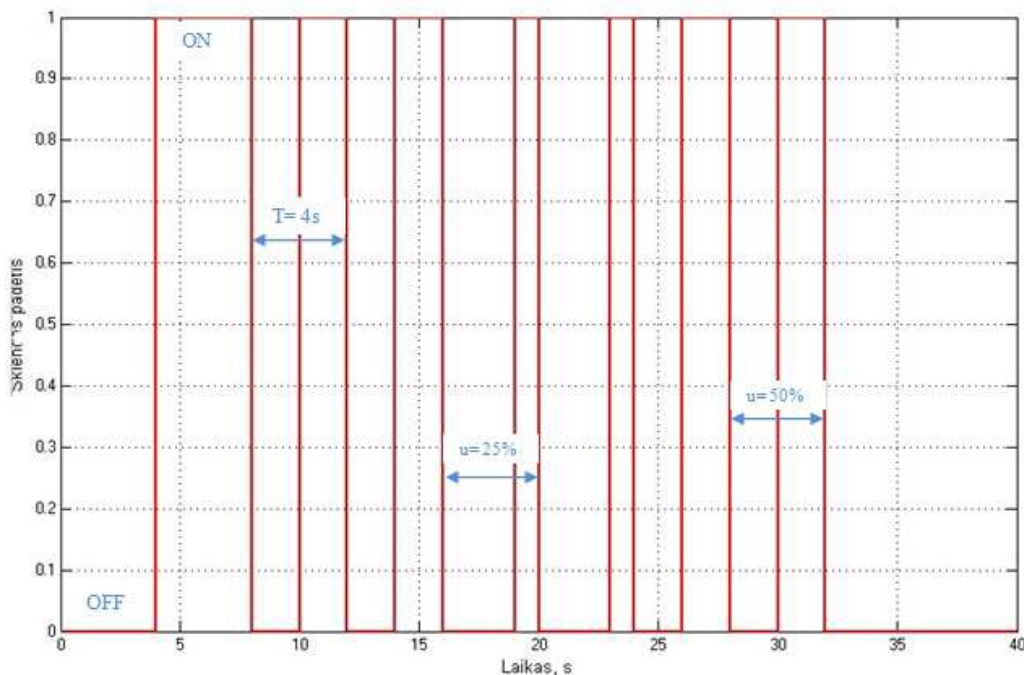
4.1 Eksperimentinis taikymas

Eksperimentiniam patikrinimui naudota sistema su programuojamu loginiu valdikliu „Orbit Merret OMC 8000“. Valdiklis koncentracijos signalą nuskaito iš koncentracijos matuoklio „Thorton 300m“, gaudamas 4-20 mA analoginį signalą. Sistemos masė indikuojama „Dini Argeo 3590EGT“ svarstyklėse, kurios valdikliui generuoja 0-10 V signalą. Principinė pajungimo schemą pavaizduota **2-me priede**. Kritinis momentas esamoje sistemoje - valdiklyje realizuoto reguliatoriaus valdymo signalo vertimas į nuoseklią impulsų seką – impulso pločio moduliaciją, priklausomai nuo valdymo signalo dydžio.

Pagal anksčiau aprašytą formulę (2.2) , vožtuvo ritėms randamas ciklo laikas. Kadangi vožtuvai nepritaikyti dideliame atsidarinėjimų ir užsidarinėjimų skaičiui per sekundę, tai praktikoje jų dažnis f svyruoja nuo 25-100 Hz. Vis dėlto, nagrinėjamu atveju turime ne elektromagnetinį vožtuvą, o pneumatinę sklendę, valdomą 24 V ritės. Taigi, atsiranda papildomas vėlinimas, paduodant suslėgtą orą į sklendę. Eksperimentiškai nustatyta, kad minimalus signalo laikas, kai sklendė sureaguoja yra 0,2 s. Norima minimali reakcija į valdymo signalą yra 5%. Mažesnę leistina paklaida d_{min} įneštų netikslumų, nes sklendė reaguotų į valdymo signalo triukšmus. Iš čia gauname, kad reikiamas periodas (ciklas) yra:

$$T_{PWM} = \frac{T_v}{d_{min}} * 100\% = \frac{0,2 * 100}{5} = 4 \text{ s} \quad (4.1)$$

Tada atviros sklendės laikas priklauso nuo valdymo signalo iš reguliatoriaus. Signalas gali varijuoti nuo 0% iki 100 %. Sklendės impulsų sekos priklausomybė nuo valdymo signalo pavaizduota **4.1 pav.**



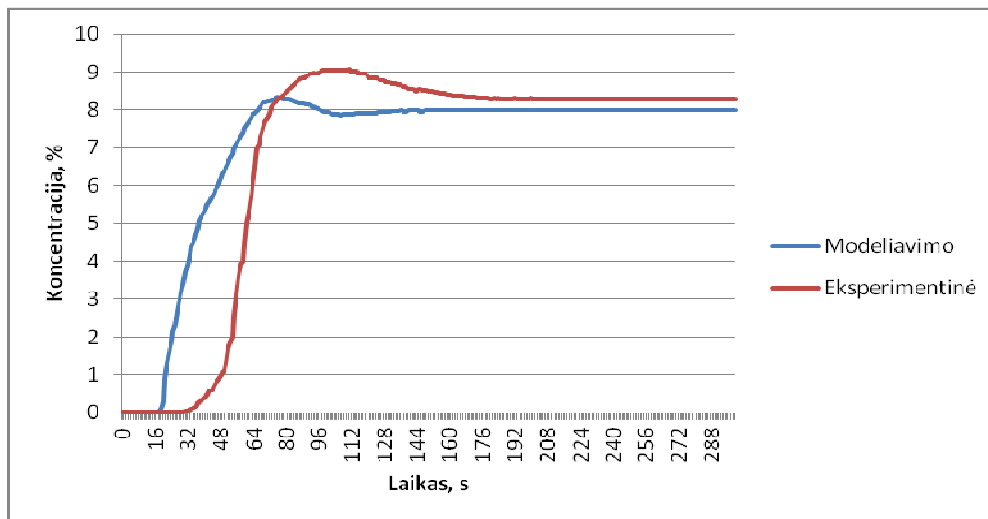
4.1 pav. PWM valdymo signalas (čia u – analoginis signalas išreikštas %)

Valdiklio programavimas atliktas, naudojant IEC 61131 standarto aprobuotomis kalbomis: struktūrizuotu tekstu (ST) ir funkcinį blokų diagramomis (FBD). Parašyta valdymo programa atvaizduota **3 priede**. Joje realizuoti PI ir P regulatoriai su matematinio modeliavimo geriausiais parametrais. Valdiklio struktūra yra tokia, kad būtina programiškai aprašyti universalius įėjimus. Analoginiai ir diskretiniai įėjimai ir impulso pločio moduliacijos išėjimai atvaizduoti **3 priede**. Čia įėjimo bloke nurodomas įėjimo tipas: 0-10 V, 4-20 mA, diskretinis PNP ar NPN įėjimas. Įėjimo kontaktas nurodomas kanale (*angl.* channel). Analoginiai įėjimai yra 12 bitų rezoliucijos.

Valdiklis turi galimybę registruoti kintamųjų duomenis. **3 priede** pateikta, kad parašytas kodas „koncentracijos“ ir „masės“ kintamųjų duomenų nuskaitymui ir rašymui į microSD kortelę. Duomenų įrašymas vykdomas tik nuspaudus valdiklio mygtuką (komanda *readcurrentkeys*), esamos reikšmės išvedamos į valdiklio ekraną bei įrašomos vertės jų vertės .txt formatu, 2 kartus per sekundę. Eksperimentinio valdymo metu duomenys surašyti į omc800.txt failą (žr. **4 priedą**).

4.2 Eksperimentiniai rezultatai

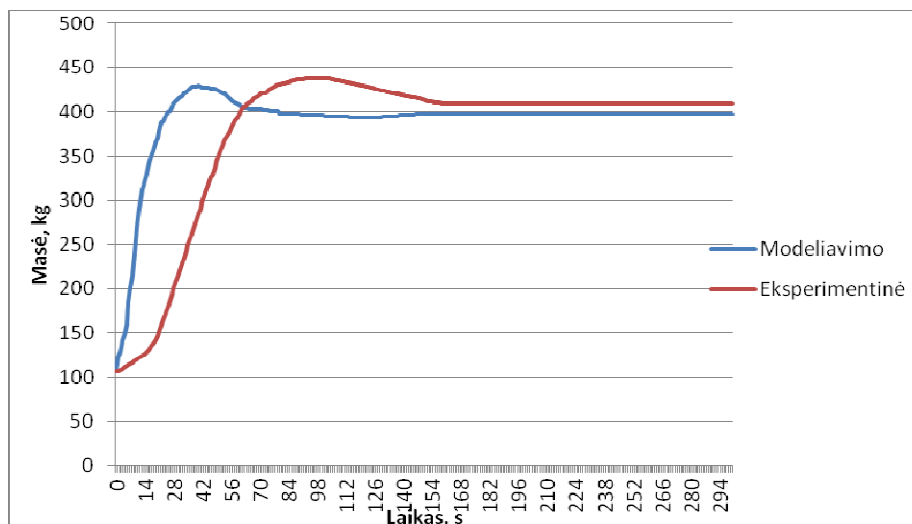
Eksperimentas buvo atliktas toks pat kaip ir modeliavimo atveju, t.y., su tomis pačiomis pradinėmis sąlygomis ir be trikdžio. Eksperimentinių rezultatų palyginimas su modeliavimo rezultatais pateiktas 4.2 ir 4.3 paveiksluose.



4.2 pav. Modeliuotos ir realios koncentracijos kreivės, kai pradinės sąlgos vienodos

Iš grafiko matyti, kad koncentracijos modeliavimo rezultatai geresni nei eksperimentiniai: modeliavimo perreguliavimas – 5% , eksperimentinis - 12,5 % , modeliavimo statinė paklaida – 0,63%, eksperimento 3,75%. Taip pat transportinis vėlinimas modelio atveju trumpesnis nei eksperimentiniu (14,5 s ir 29,5 s). Pastebėta, kad realiu atveju koncentracijos charakteristika yra statesnė nei modelio. Tai sistemos inertiškumo pasekmė.

Eksperimento metu gauta masės charakteristika (4.3 pav.) yra su 9 % perreguliavimu. Nusistovėjusi statinė paklaida – 2,5 %. Nusistovėjimo laikas ties 156 s riba. Pneumatinės pavaros, lyginant su elektrinėmis ar hidraulinėmis yra „elastingos“. Tai reiškia, kad dėl suslėgto oro fizikinių plėtimosi savybių, atsiranda netikslumų. Sklendė pradeda elgtis lyg papildoma diferencijuojanti dedamoji, taip slopindama proceso stiprinimą [11]. Dėl šios priežasties ne taip sparčiai pasiekiamos užduotos vertės. Praktikoje, sistemos su grįžtamoju ryšiu, kur reikia didelio tikslumo, tokios pavaros ar sklendės taikomos retai. Matematiniam sistemos modeliui ši suslėgto oro savybė, taikant trumpus valdymo impulsus sklendei, nebuvo įvertinta.



4.3 pav. Modeliuotos ir realios masės kreivės, kai pradinės sąlgos vienodos

Sistemos eksperimentiniai rezultatai parodė, kad matematinio modelio dėka parinkti reguliatorių parametrai yra korektiški. Tiesa, neišvengti charakteristikų perreguliavimai (koncentracijos perreguliavimas 12,5%), bet statinės paklaidos tikrai neblogos – nesiekia 5 % užduotos vertės. Norimos vertės pasiekiamos kone 10 kartų greičiau nei esamo realizuoto valdymo (vidutiniškai 400 kg, 8 % tirpalas ruošiamas apie 45 min, eksperimentinės sistemos užduotos vertės nusistovi ties ~ 4min. riba).

Efektyvesniam sistemos valdymui gauti, reikėtų apsvarstyti sistemos inertiškumo faktoriaus klausimą. Tam reikėtų trumpinti vamzdžio atstumą nuo sklendės iki maišymo talpos, sklendę montuojant prie pat koncentrato padavimo į talpą. Taip galima išvengti net 14,5 s transportinio vėlinimo. Kita vertus, naudinga būtų pakeisti ir sklendės tipą, pneumatinę pakeičiant elektromechanine, taip išvengiant pašalinio diferencijuojančio poveikio. Šie pakeitimai turėtų užtikrinti minimalų perreguliavimą ir stabilią reakciją į bet kokio tipo trikdžius.

Išvados

1. Nustatyta, kad pagal esamos druskos tirpalo ruošimo sistemos pajėgumus (Q_{H_2O} - 3,34 kg/s, Q_{NaCl} - 3,21 kg/s) ji yra neefektyvi ir dirba per lėtai (vidutiniškai 400 kg sumaišo per 45 min.). Svarbiausi taisytini parametrai yra šie: tirpalo ruošimo laikas, koncentracijos ir tūrio statinės paklaidos mažinimas. Būtina keisti neracionalų valdymo algoritmą, pritaikant optimalų reguliatorių.
2. Atlikus atviros sistemos matavimų bandymus, kai į ją paduotos šuolinės koncentracijos ir masės reikšmės, gautos reakcijos charakteriskos. Iš charakteriskų nustatytas sistemos valdomumo santykis jos koncentracijai ir masei ($CR_{NaCl}=0,5$ ir $CR_M=0,2$), patvirtinantis, kad sistemos koncentracija yra „vidutiniškai sunkiai“ valdoma, o masė – „lengvai“.
3. Matematinis druskos ruošimo talpos modelis aprašytas diferencialinėmis lygtimis. Sudarytos masės balanso ir koncentracijos kitimo talpoje lygtys. Aprašytas realios sistemos pakaitalas – modelis pretendentas, kuris įvertina visus transportinius vėlavimus, yra svarbus tyrimų pagrindas.
4. Sumodeliuotos P, PI reguliatorių ir fuzzy reguliatoriaus valdomos sistemos. Regulatoriai derinti pagal Zieglerio – Nicholso pasiūlytą metodiką. Nustatyta, kad dėl tolydesnių reguliatorių valdymo signalų ir proceso išėjimo charakteristikų, eksperimentiniam taikymui tinkamesnis P ir PI reguliatorių sistemos valdymo modelis.
5. Pasirinkto modelio adekvatumui patikrinti atliktas eksperimentas. Eksperimente nustatyta, kad realios sistemos kintamųjų charakteristikos šiek tiek prastesnės nei modeliavimo, t.y., gautos didesnės statinės paklaidos ir perreguliavimai, bei nusistovėjimo laikai. PID modelyje neįvertintas pneumatinės sklendės diferencijuojantis poveikis. Eksperimentiniai rezultatai įrodo, kad reguliatorių parametrai parinkti korektiškai ir toks valdymo algoritmas sistemai teikia aiškią naudą – iki 10 kartų pagreintintų tirpalo ruošimo laiką.

Informaciniai šaltiniai

- [1] JANUŠEVIČIUS, V.S. Automatinis valdymas. Kaunas: Technologija, 2003.
- [2] CARNEGIE INSTITUTE OF TECHNOLOGY. An index of controllability linear deterministic process [interaktyvus]. [Pittsburgh, United States]: may 1989 [žiūrėta 2015 m. sausio 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1128&context=cheme>.
- [3] ALEKSA, V., GALVANAUSKAS, V. Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. Kaunas: Technologija, 2008.
- [4] SINGH, Y., JANARDHANAN, S. Modern Control Engineering. Singapore: Cengage Learning, 2011, p. 517.
- [5] LEVIŠAUSKAS, D. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008, p. 99.
- [6] LILLY, J.H. Fuzzy Control and Identification. New Jersey: Wiley, 2010, p. 27.
- [7] KILIAN, C. Modern Control Technology Componenets and Systems. New York: Thomson Learning, 2006, p. 423.
- [8] IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. Accurate Position Control of Pneumatic Actuator using On/Off solenoid valves [interaktyvus]. [Hamilton, Canada]: september 1997 [žiūrėta 2015 m. gegužės 19 d.] Prieiga per internetą: [http://user.das.ufsc.br/~victor/ArtigosProjetoC/VA1lvulas/Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using on-off solenoid valves.pdf](http://user.das.ufsc.br/~victor/ArtigosProjetoC/VA1lvulas/AccuratePositionControlofaPneumaticActuatorUsingon-offsolenoidvalves.pdf)
- [9] KRIVTS, I., KREJNIN, G. Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment. New York: Taylor and Francis Group, 2006, p.113.
- [10] SIMUTIS, R. Sistemų modeliavimas ir identifikavimas. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008, p. 35.
- [11] STANFORD UNIVERSITY. Discrete time simulation of air-flow cut-off in pressure controlled valves [interaktyvus]. [Stanford, United States: october 2003 [žiūrėta 2015 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1285873>.