



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Mindaugas Sakalis

**VALDYMO SISTEMŲ TYRIMAS AKTYVIOJO DUMBLO
MODELIO PAGALBA**

Magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Donatas Levišauskas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**VALDYMO SISTEMŲ TYRIMAS AKTYVIOJO DUMBLO
MODELIO PAGALBA**

Magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Donatas Levišauskas
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Kęstutis Brazauskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mindaugas Sakalis
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Mindaugas Sakalis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Mindaugo Sakalio** baigiamasis projektas tema „Valdymo sistemų tyrimas aktyvaus dumblo modelio pagalba“ 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)

Sakalis, M. Valdymo sistemų tyrimas aktyvaus dumblo modelio pagalba. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame projekte yra nagrinėjamas aktyvaus dumblo proceso pramoniniame aerotanke imitacinis modelis. Vienas pagrindinių darbo tikslų yra panaudoti proceso imitacinį modelį ištirpusio deguonies koncentracijos adaptyvaus valdymo sistemos sukūrimui ir tyrimui. Darbe naudojamas aktyvaus dumblo proceso imitacinis modelis yra išplėstas pridedant teršalų koncentracijų skaičiavimo modelį. Išplėstas proceso modelis panaudotas įvairių technologinių režimų ir proceso reakcijų į trikdančius poveikius modeliavimui. Modeliavimo rezultatai panaudoti PI reguliatoriaus adaptacijos algoritmo (*gain scheduling*) sudarymui. Pateikta adaptacijos algoritmo sudarymo metodika, paremta reguliatoriaus parametrų priklausomybe nuo įtekančio nuotekų srauto, ir atliktas adaptyvios valdymo sistemos veikimo imitacinis modeliavimas. Pateikti adaptyvios sistemos tyrimo rezultatai ir rekomendacijos ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemų projektavimui.

Reikšminiai žodžiai: nuotekų valymas, aktyvus dumblas, adaptyvus valdymas, ištirpusio deguonies koncentracija.

Sakalis, Mindaugas. An investigation of control systems using activated sludge model. Master project of control systems / supervisor prof. dr. Donatas Levišauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of automation.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SUMMARY

In this final master's degree project, investigation of activated sludge process in industrial reactor is carried out. One of the main goals of this project is to use an activated sludge model for a design and investigation of adaptive dissolved oxygen concentration control system. Activated sludge mathematical model is enhanced with an addition of effluent quality calculations. Moreover, enhanced process simulator is used for simulation of various technological regimes and system responses to disturbances. Modelling results are used for the design of PI controller adaptation algorithms (*gain scheduling*). A methodology of adaptive control system design is presented, it is based on relationship between controller parameters and flow rate of wastewater influent, and simulation of adaptive control system is carried out. Results and recommendations for a design of adaptive dissolved oxygen control system are presented in the project.

Keywords (up to 8 words): wastewater treatment, active sludge, adaptive control, dissolved oxygen concentration.

TURINYS

IVADAS.....	8
1. APŽVALGINĖ DALIS	9
1.1 Biologinio nuotekų valymo technologijos	9
1.1.1 Aktyviojo dumblo procesas	10
1.1.2 Biologinio azoto šalinimo iš nuotekų principai.....	11
1.1.3 Aktyvaus dumblo aeracijos metodai.....	12
1.1.3.1 Difuzinis aeravimas.....	12
1.1.3.2 Paviršinis aeravimas.....	12
1.2 Proceso valdymas.....	13
1.2.1 Reguliuojami parametrai	13
1.2.2 Adaptyvaus valdymo principai.....	13
1.2.3 Adaptyvaus valdymo schemas	14
1.2.3.1 Stiprinimo numatymas	15
1.2.3.2 Referencinio modelio adaptyvus valdymas	15
1.2.3.3 Susiderinantis reguliatorius	16
2. METODINĖ DALIS	17
2.1 Aktyvaus dumblo modelis Nr. 1 (ASM1)	17
2.1.1 Būsenos kintamieji – COD komponentai ASM1 modelyje	17
2.1.2 Būsenos kintamieji – azoto ir kiti komponentai ASM1 modelyje	18
2.1.3 Dinaminiai procesai.....	19
2.1.4 Modelio lygtys.....	20
2.1.5 Apribojimai modelyje.....	25
2.2 Teršalų koncentracijos skaičiavimai	25
2.3 Modelio tobulinimas ir modeliavimo eksperimentų metodologija	26
2.4 Adaptacijos (<i>gain scheduling</i>) algoritmo sudarymo metodika	27
3. MODELIAVIMO EKSPERIMENTŲ REZULTATAI.....	29
3.1 Ištirpusio deguonies koncentracijos ARS tyrimas	29
3.2 Sistemos reakcijos į nuostato pokytį tyrimas lokaliame darbo taške.....	30
3.3 Sistemos reakcijos į šuolinį trikdantį poveikį tyrimas lokaliame darbo taške	32
3.4 Adaptacijos algoritmo sudarymas	33
3.5 Adaptyvios valdymo sistemos reakcijos į kintantį trikdantį poveikį tyrimas	35
3.6 Adaptyvaus valdymo sistemos reakcijų į kintantį trikdantį poveikį ir į kintantį nuostatą tyrimas	39

IŠVADOS IR REZULTATAI.....	42
LITERATŪROS SARAŠAS	44
PRIEDAI.....	46

IVADAS

Nuolatos brangstant energetiniams šaltiniams ir didėjant aplinkosauginiams reikalavimams vis aktualesnis tampa efektyvus svarbiausių technologinių procesų valdymas biologiniuose vandens valymo procesuose.

Aktyvusis dumblas – tai tam tikroje nuotekų valymo įrenginių dalyje esančios nuotekų dalelės ir mikroorganizmai. Šie mikroorganizmai gyvena ir natūralioje aplinkoje, tačiau biologiniuose nuotekų valymo įrenginiuose jiems sudaromos palankios mitybos ir dauginimosi sąlygos [1]. Aktyvaus dumblo procesas yra vienas iš plačiausiai naudojamų skystų nuotekų apdorojimo būdų (iš esmės dėl pigios technologijos), kuri gali būti pritaikyta bet kokioms nuotekoms. Bakterinė biomasės terpė aktyvaus dumblo procese yra atsakinga už teršalų pašalinimą. Biologinis nuotekų valymo procesas yra vienas sudėtingiausiai valdomų procesų, nes kokybiškam valdymui įtakos turi daug skirtingų veiksnių: trikdantieji poveikiai gali būti milžiniški, procesas pasižymi žymiais netiesiškumais, egzistuoja daug taršos šaltinių, išleidžiamo vandens reikalavimai ateityje bus dar griežtesni.

Nagrinėjamas aktyvaus dumblo procesas yra netiesinis, veikiamas daugelio trikdžių, todėl darbe yra tiriamos adaptyvaus valdymo galimybės. Šios sistemos įvertina procesą veikiančius trikdžius ir technologinius kintamuosius, adaptuojasi proceso būsenai pasikeitus ir taip žymiai pagerina valdymo kokybę. Adaptyviosios valdymo sistemos sugeba įvertinti daugiau technologinių kintamųjų, jos greitai adaptuojasi, stabiliai dirba ir jas lengva įdiegti į jau veikiančias automatinio reguliavimo sistemas [7].

Darbo tikslas: aktyvaus dumblo imitacinio modelio pagalba atlikti proceso dinaminių savybių tyrimą ir sudaryti ištirpusio deguonies koncentracijos PI reguliatoriaus parametru adaptacijos algoritmus bei atlikti adaptyvios valdymo sistemos tyrimą.

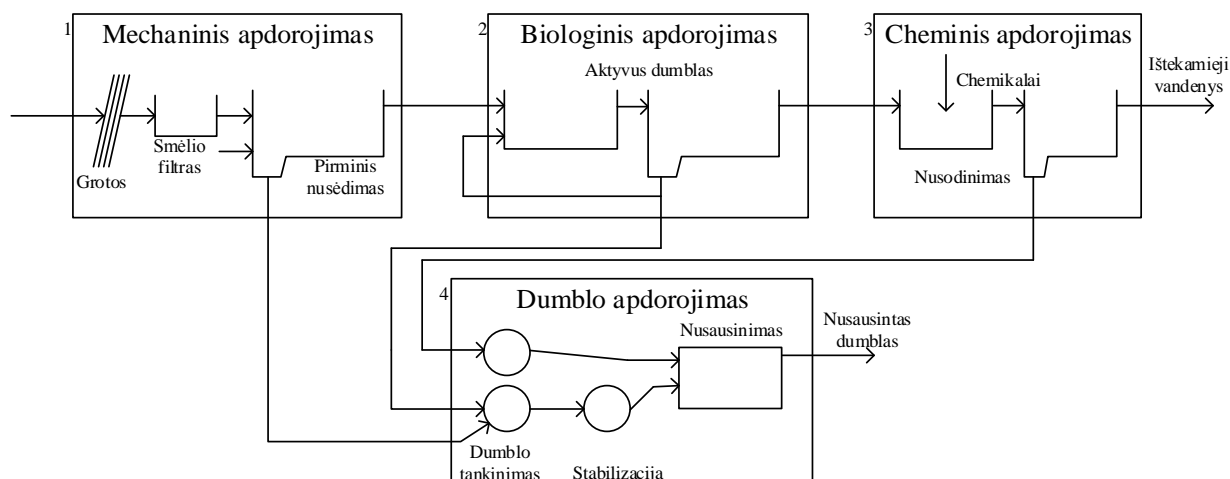
Darbo uždaviniai: išanalizuoti informacinius šaltinius apie aktyvaus dumblo modelį, patobulinti imitacinį modelį įvedant apribojimus ir vėlavimus proceso parametrų, sudaryti nutekamųjų vandenų teršalų skaičiavimo modelį. Taip pat pritaikyti reguliatoriaus parametru adaptaciją pagal įtekančių nuotekų srautą, naudojant stiprinimo numatymo metodologiją, ir palyginti sistemos reakcijas į trikdantį poveikį ir nuostato kitimą, naudojant adaptyvų ir PI reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais.

1. APŽVALGINĖ DALIS

1.1 Biologinio nuotekų valymo technologijos

Vandens, panaudoti buityje, energetikoje, pramonėje, technologiniuose procesuose ir turintys taršos priemaišų, vadinami nutekamaisiais vandenimis. Nutekamieji vandenys pagal kilmę gali būti: buitiniai, pramoniniai, žemės ūkio ir kt. [3].

Moderniuose vandens valymo įrenginiuose nuotekos įprastai yra apdorojamos keliais etapais prieš jas išleidžiant į aplinką. Tipinė vandens valymo įrenginių schema pavaizduota 1.1 pav. Keturi blokai vaizduoja skirtingus vandens valymo proceso etapus [4,5].



1.1 pav. Tipinio vandens valymo įrenginio schema [4]

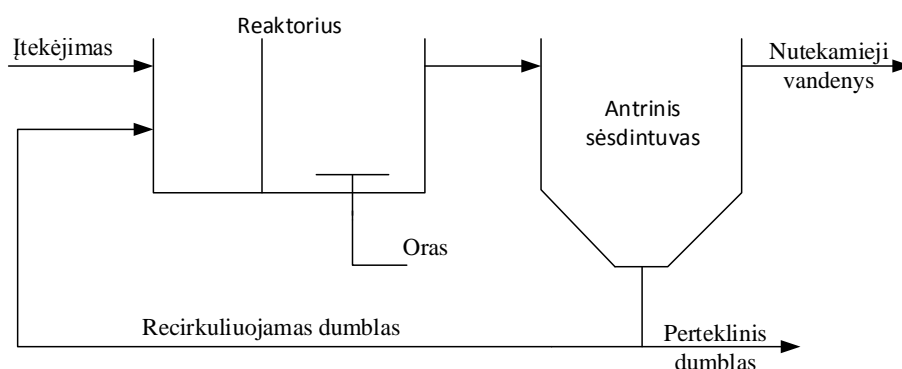
1. Pirmiausiai vykdomas pirminis nuotekų apdorojimas, t. y., panaudojus grotas ir smėliagaudes, pašalinamos mechaninės priemaišos ir nuotekos nuskaidrinamos, po to jos paliekamos nusistovėti pirminiuose nusodintuvuose.
2. Antrasis etapas dažniausiai yra biologinis apdorojimas. Šiame vandens valymo etape mikroorganizmai skaido organines medžiagas. Yra daug skirtingų biologinių procesų, tačiau plačiausiai naudojamas aktyvaus dumblo procesas. Pagrindinį aktyvaus dumblo procesą sudaro aeruojamas rezervuaras ir sėdintuvas. Mikroorganizmai aeruojamose rezervuaruose auga lėtai. Tam, kad būtų išlaikytas mikroorganizmų populiacijos dydis, perteklinis dumblas iš sėdintuvo yra recirkuliuojamas atgal į aeruojamus rezervuarus.
3. Trečiajame etape vyksta fosforo ir azoto junginių atskyrimas ir nusodinimas, tačiau dažnai šis žingsnis yra atliekamas ir proceso pradžioje. Šiame procese yra naudojami chemikalai,

kurie paverčia fosfatus į kietąsias medžiagas. Netirpūs fosfatai, taip pat kaip ir organiniai, absorbuojasi ir sukimba kuokštais. Jie yra atskiriami nusėdimo arba plūduriavimo būdu.

4. Pirmuose trijuose etapuose susidariusio dumblo skaidymas vyksta aerotankuose. Dumblas yra sudarytas iš organinės medžiagos, kuri turi būti stabilizuota tam, kad būtų panaikintas kvapas ir ligas sukeliantys mikroorganizmai. Stabilizacija įprastai yra atliekama anaerobiniuose pūdintuvuose. Pūdintuvuose ligas sukeliančios bakterijos bei mikroorganizmai miršta dėl aukštos temperatūros. Pūdymo metu išsiskiria bio-dujos, metanas ir anglies dvideginis. Prieš pašalinant dumblą iš pūdintuvų, jis yra nusausinamas: mechaniškai, centrifugiškai, filtruojant, presuojant arba sausinant. Šis procesas sumažina transportavimo kaštus, nes vanduo sudaro 95 proc. dumblo sudėties [4,5].

1.1.1 Aktyviojo dumblo procesas

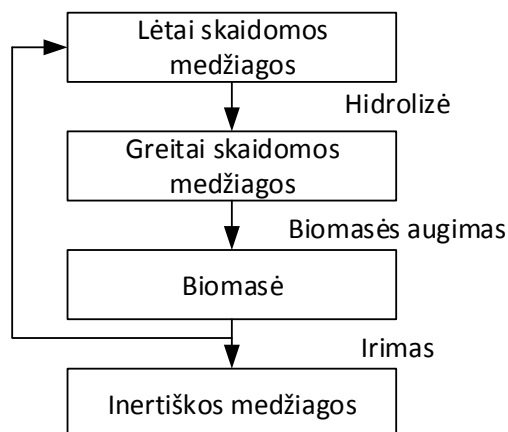
Supaprastinta aktyvaus dumblo proceso (ADP) schema pavaizduota 1.2 pav.: iš antrinio sėdintuvo, dumblas yra dalinai recirkuliuojamas į bioreaktorių ir dalinai pašalinamas iš proceso kaip perteklinis dumblas. ADP yra biologinis procesas, kuriame mikroorganizmai oksiduoja ir mineralizuoja (*mineralize*) organines medžiagas. Didžioji dalis mikroorganizmų, esančių aktyviame dumble, yra bakterijos, kurios taip pat yra randamos į valymo įrenginius įtekančiose nuotekose. Bakterijų sudėtis ir rūšis priklauso ne tik nuo įtekančių nuotekų, bet ir nuo vandens valymo proceso ir jo veikimo [9,10].



1.2 pav. Supaprastinta aktyvaus dumblo proceso schema [10]

Siekiant, kad bakterijos pastoviai augtų, joms yra reikalinga energija. Deguonis yra naudojamas tam, kad mikroorganizmai galėtų oksiduoti organines medžiagas. Bakterijos, kurios gali daugintis aerobinėje ir anoksinėje aplinkoje, yra vadinamos heterotrofais. Jos sudaro didžiąją dalį aktyvaus dumblo bakterijų. Kita svarbi bakterijų rūšis aktyvaus dumblo procese yra autotrofai. Jie auga esant tik aerobinėms sąlygoms ir naudoja neorganinę anglį kaip substratą [5,10].

Biologinio atsinaujinimo procesas, kuris vyksta bioreaktoriuje, pavaizduotas 1.3 pav. Organinės medžiagos į procesą patenka būdamos vienos būsenos, o veikiant biologiniams procesams jos paverčiamos į kitas. Pirmiausia, dėl vykstančio hidrolizės proceso, didelės organinės medžiagos yra paverčiamos į greitai yrančias medžiagas. Biomasės augimo greitis priklauso nuo daugelio kintamųjų: tokių kaip biomasės kiekis, temperatūra, substratas, pH ir t.t. Yrant mikroorganizmams yra gaminamos biologiškai inertiškos (neyrančios medžiagos).

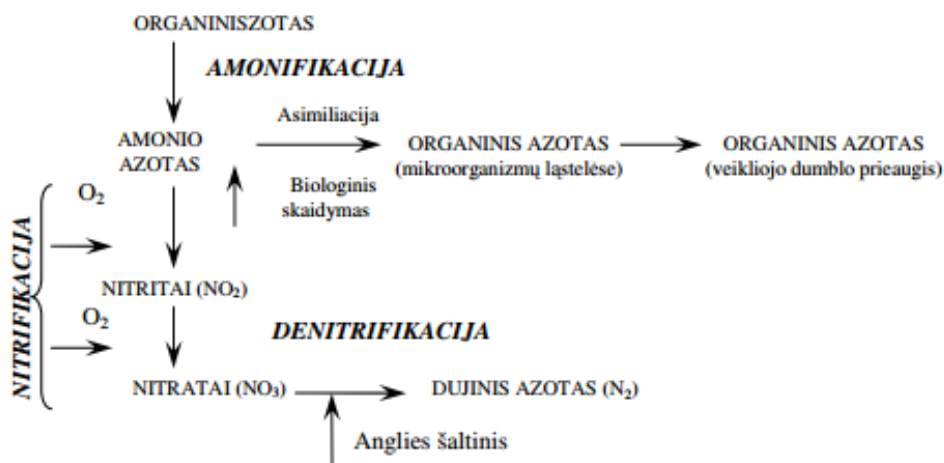


1.3 pav. Biologinių procesų atsinaujinimo schema [10]

1.1.2 Biologinio azoto šalinimo iš nuotekų principai

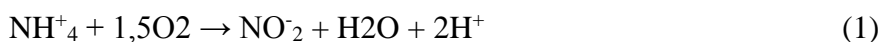
Nuotekose azotas gali būti tirpioje arba netirpioje būsenoje, organinėje arba mineralinėje formoje. Neišvalytose nuotekose mineralinis azotas (NH_3 ar NH_4) sudaro apie 75 proc. azoto. Amonio azotas sudaro apie 95 proc. mineralinio azoto neišvalytose nuotekose, kurių pH 7-8,5 [2].

Biologinis nuotekų šalinimas pagrįstas nitrifikacijos ir denitrifikacijos procesais (1.4 pav.).



1.4 pav. Azoto junginių skaidymo, biologinių nuotekų valymo įrenginiuose, modelis [2]

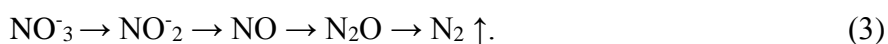
Nitrifikacija – tai biocheminis procesas, kurio metu nitrifikuojančios bakterijos oksiduoja amonio azotą NH_4 iki nitratų. Nitrifikuojančios bakterijos skirstomos į dvi grupes. Pirmoji grupė bakterijų oksiduoja amonio azotą iki nitritų [2,3]:



Antroji grupė bakterijų nitritus oksiduoja į nitratus:



Denitrifikacija – tai biocheminis procesas, kuriam vykstant denitrifikuojančios bakterijos redukuoja nitratus iki dujinio azoto. Denitrifikaciją vykdo heterotofinės bakterijos. Denitrifikacija vyksta pagal tokią schemą:



1.1.3 Aktyvaus dumblo aeracijos metodai

1.1.3.1 Difuzinis aeravimas

Rezervuarų, į kuriuos įteka nuotekos, dugne yra naudojama difuzorių aeracijos sistema. Paprastas difuzinio aeravimo sistemos pavyzdys yra akvariumas. Vandens valymo įrenginiuose veikimo principas yra toks pat, tačiau viskas vyksta didesniu mastu. Pumpuojant orą per blokus susidaro oro burbulai, kurie tuo pačiu metu ir prisotina nuotekų terpę deguonimi, ir atlieka maišymo funkciją [6].

1.1.3.2 Paviršinis aeravimas

Šio tipo aeravimo sistemoje yra vertikaliai sumontuojami iki 1 metro diametro vamzdžiai nuo rezervuaro dugno iki nuotekų paviršiaus. Jų aukštis gali siekti iki 10 metrų. Paviršiuje vamzdis yra kūgio formos su sraigtiniais sparnais, pritvirtintais prie vidinio paviršiaus. Kai vamzdis sukasi, sparnai pakelia skystį į viršų ir stumia lauk iš vamzdžio. Tokiu būdu naujos nuotekos yra įtraukiamos iš rezervuaro apačios [6].

1.2 Proceso valdymas

1.2.1 Reguliuojami parametrai

Procesų valdymo inžinieriams nutekamųjų vandens valymo procesai yra įdomūs tuo, kad procesai yra netiesiniai, kintantys laike, turi skirtingą dinamiką bei daug kintamųjų. Daugelis matuoklių vis dar nėra patikimi ir procesuose yra daug trikdančiųjų poveikių [7,8,11].

Literatūroje [11] pateikiami aktyvaus dumblo proceso automatinio valdymo pavyzdžiai:

- ištirpusio deguonies koncentracijos (IDK) reguliavimas;
- nitratų koncentracija gali būti sumažinta naudojant papildomą substratą;
- svarbus yra chemikalų dozavimo valdymas;
- nitratų koncentracija anoksiniuose rezervuaruose gali būti valdoma recirkuliuojančio dumblo kiekiu;
- amonio koncentracija gali būti reguliuojama IDK nuostatu ir (arba) aerobinių zonų skaičiumi;
- santykių ir tūrio srautų optimizavimas.

1.2.2 Adaptyvaus valdymo principai

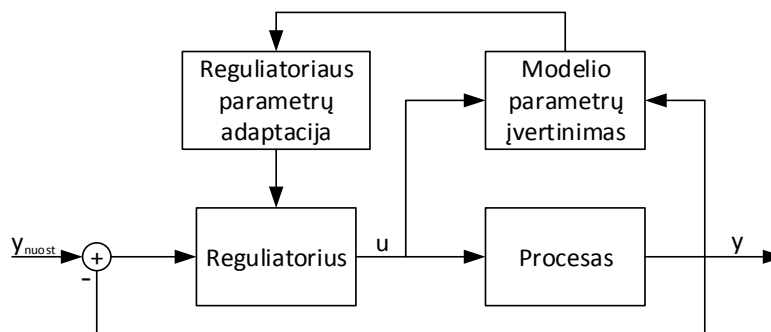
Įprastai žodynuose žodžio adaptacija reikšmė yra paaiškinama kaip biologinė adaptacija prie aplinkos. Tačiau, valdymo sistemų aplinkoje adaptyvaus valdymo tikslas yra sujungti du valdymo sistemos komponentus: reguliatorių ir valdomą procesą. Adaptyvios valdymo sistemos tikslas yra suteikti tikslų valdymą automatiškai modifikuojant reguliatoriaus parametrus ir/arba jo struktūrą, kai valdomi parametrai keičiasi tam tikrame numatyta diapazone [14,18].

Matematiniais modeliais paremtoje metodologijoje, valdomas procesas ir reguliatorius yra aprašomi atitinkamomis matematinėmis išraiškomis: diferencialinėmis arba matricinėmis išraiškomis laiko srityje, arba perdavimo funkcijomis dažnių srityje. Adaptyvaus valdymo pagrindai yra paremti sistemos stabilumo teorija, optimaliu valdymu, stochastinėmis aproksimacijomis ir dualiniu valdymu [18].

Analizuojant pramoniniu aspektu, adaptyvaus valdymo sistemos yra reikalingos siekiant sukurti valdymo sistemą, kuri galėtų sėkmingai dirbti skirtinguose darbo taškuose, tačiau su minimaliomis žiniomis apie sistemos dinamiką. Pramoniniai procesai pagal valdomą aplinką gali būti skirstomi į dvi grupes [18,19,20]:

- nepertraukiamos gamybos sistemos, kurių dinamika laikui bėgant įprastai kinta lėtai ir pastoviai. Pvz: distiliacijos kolonos, cheminiai reaktoriai, šiluminio apdorojimo procesai, vandens valymo procesai;
- periodiniai procesai su pamaitinimu, (*semi-batch*). Pamaitinimo sistemos yra populiaros biotechnologijų ir pramonės industrijų sistemose.

Netiesioginis derinimas dažniausiai yra realizuojamas naudojant proceso modelį. Netiesioginio derinimo sistemos gali būti atvaizduotos blokine schema, kuri pateikiama 1.5 pav.



1.5 pav. Netiesioginio derinimo sistemos blokinė schema [12]

Netiesioginio adaptyvaus valdymo sistemoje, norint sudaryti reguliatoriaus adaptacijos algoritmą, pirmiausia reikalingas modelio parametru įvertinimo blokas, kuriame pagal proceso įėjimų ir išėjimų matavimus yra identifikuojami modelio parametrai. Taip pat sistemoje yra reguliatoriaus adaptacijos blokas, kuris pagal įvertintą proceso modelį realiu laiku suskaičiuoja reguliatoriaus parametrus [12, 18].

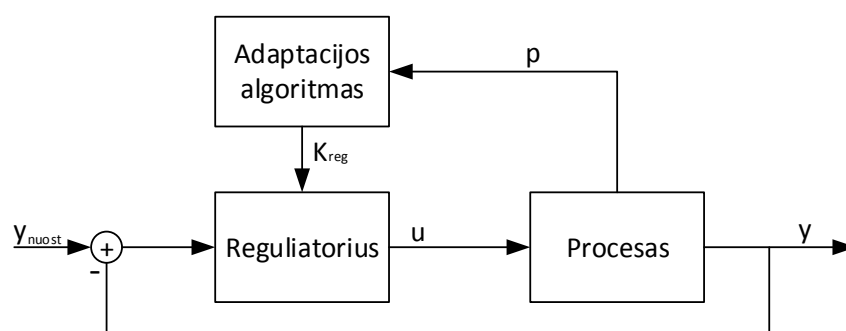
Galima išskirti du pagrindinius *tiesioginių* metodų uždavinius. Pirmas – surasti tinkamus požymius, kurie apibūdintų uždaros sistemos savybes. Antras – norint gauti pageidaujamus sistemos kokybės rodiklius, reikia rasti tinkamus reguliatoriaus parametru keitimo būdus [12].

1.2.3 Adaptyvaus valdymo schemas

Įprastinė grįžtamojo ryšio valdymo sistema susideda iš valdomo proceso sistemos ir reguliatoriaus su keičiamais parametrais. Adaptyvaus valdymo sistemos problema yra surasti realų būdą modifikuoti reguliatoriaus parametrus besikeičiant sistemos dinamikai. Pagrindinis adaptyvaus valdymo sistemos tikslas yra minimizuoti paklaidą tarp užduotosios vertės ir valdomo parametro išėjimo. Adaptyvaus valdymo struktūra gali būti apibūdinama trimis populiariausiomis schemomis: stiprinimo numatymas (*gain scheduling*), referencinio modelio valdymas (*model reference control*) ir susiderinantis reguliatorius (*self-tuning control*) [18,21].

1.2.3.1 Stiprinimo numatymas

Daugelyje pramoninių sistemų, tarp jų ir vandens valymo įrenginiuose, statinis stiprinimas, laiko pastoviosios ir vėlavimai turi įtakos proceso veikimo sąlygoms. Suradus pagrindinius parametrus, apibūdinančius sistemos veikimo sąlygas ir jos dinamiką, galima nustatyti tam tikrą ryšį tarp sistemos dinamikos ir reguliatoriaus parametru, kuris gali būti panaudotas tolimesniam reguliatoriaus derinimui. Stiprinimo numatymo struktūrinė schema pavaizduota 1.6 pav. [12,18,21].

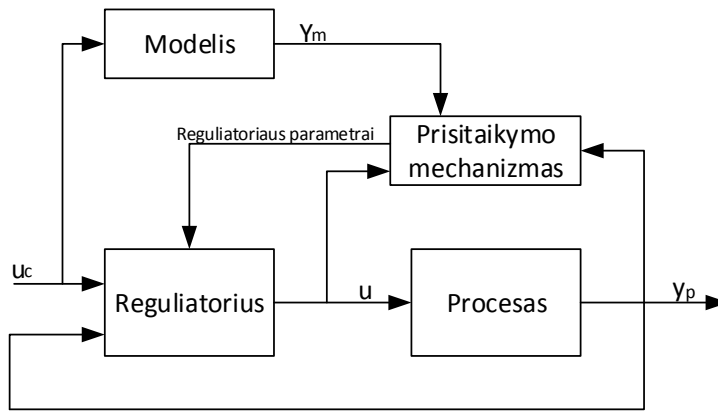


1.6 pav. Stiprinimo numatymo struktūrinė schema [12]

Didelis šio metodo privalumas yra toks, kad nėra reikalingos realaus laiko sistemos identifikavimo ar optimizavimo paieškos. Todėl reguliatoriaus parametru derinimas yra tiesioginis, o dinaminis sistemos atsakas yra greitesnis nei naudojant kitus metodus. Tačiau, naudojant šį būdą, daug laiko užima kiekybinių priklausomybių paieška tarp proceso pagalbinių parametru, reguliatoriaus parametru ir atitinkamo uždaro kontūro stabilumo, nes reikia atlikti daug simuliacijų, ypač netiesinėms ar daug kintamųjų turinčioms sistemoms. Be to, stiprinimo numatymas yra atviro kontūro kompensuojamoji grandis, be jokio grįžtamojo ryšio informacijos apie stiprinimo poveikio įtaką procesui. Todėl sistema gali būti stabili ir gerai veikti, tik jeigu sistemos darbo sritis yra pilnai aprašyta ir išanalizuota sistemos kūrimo fazėje [18].

1.2.3.2 Referencinio modelio adaptyvus valdymas

Šios valdymo sistemos tikslas yra sukurti grįžtamojo ryšio reguliatorių su parametrais, kuris galėtų pakeisti sistemos išėjimą taip, kad jis sutaptų su norimo modelio išėjimu. Referencinio modelio adaptyvią sistemą (MRAS) sudaro referencinis modelis ir valdymo sistema su grįžtamoju ryšiu. MRAS tikslas yra priversti valdomą kintamąjį (y_p) sekti arba dubliuoti referencinio modelio Y_m išėjimą, keičiant reguliatoriaus parametrus (1.7 pav.) [12,18,21].



1.7 pav. Referencinio modelio adaptyvaus valdymo struktūrinė schema [18]

Ši adaptyvaus valdymo sistema gali būti apibūdinta kaip realaus laiko optimizavimo problema:

$$\min_g \sum_k \|y_m(k) - y(k)\|^2 \quad (4)$$

Iš aukščiau pateiktos lygties, g – keičiamas reguliatoriaus parametų vektorius. Rezultate paklaida turėtų konverguoti į nulį. Svarbiausias tikslas, kuriant MRAS, yra sukurti reguliavimo (*adjustment*) mechanizmą. Paklaidos gradientu paremtas metodas yra dažnai naudojamas, siekiant realizuoti parametų reguliavimą. MRAS yra grįžtamojo ryšio sistema ir jos paklaidos atsakas (stabilumas ir adaptacijos greitis) gali būti valdomi keičiant reguliatoriaus parametų adaptacijos greitį (*rate*) [18].

1.2.3.3 Susiderinantis reguliatorius

Susiderinančio reguliatoriaus valdymo (STR) sistema įprastai yra sudaryta iš rekursinio parametų estimatoriaus ir reguliatoriaus, pastarojo reguliavimo dėsnio ir parametų nustatymo. Naudojant STR sistemą labai svarbu parinkti realaus laiko parametų apskaičiavimo metodą, trikdančius bandymo signalus ir reguliatoriaus kūrimo metodą. Susiderinančio reguliatoriaus sistemos reakcija priklauso ir nuo parametų įvertinimo, ir sutapimo tarp valdymo dėsnio ir identifikuoto proceso modelio įvykdymo tarp sukurto valdymo dėsnio ir identifikuoto proceso modelio atitikimo. STR sistema yra kuriama remiantis identifikuoto modelio informacija [18,21].

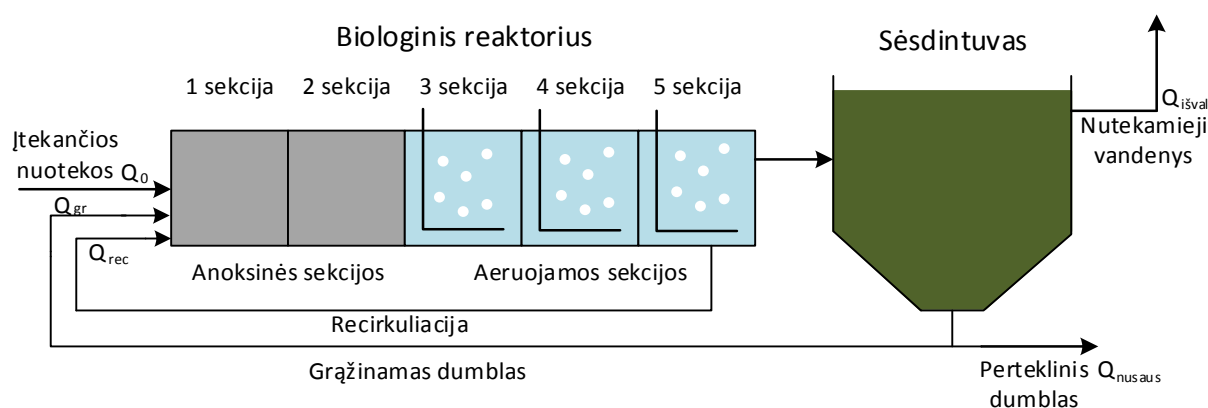
Siekiant pritaikyti STR sistemą praktikoje, reikia atsižvelgti į šiuos aspektus [18]:

- sistemos su grįžtamoju ryšiu parametų įvertinimas;
- kriterijų parinkimas kuriant valdymo algoritmą;
- valdymo algoritmų parinkimas kuriant adaptyvaus valdymo sistemą.

2. METODINĖ DALIS

2.1 Aktyvaus dumblo modelis Nr. 1 (ASM1)

1983 m. tarptautinė vandens asociacija suformavo darbo grupę, kurios tikslas – skatinti plėtrą ir palengvinti praktinių modelių pritaikymą kuriant ir modernizuojant biologinio vandens valymo sistemas. Pirmiausia buvo peržvelgiami egzistuojantys modeliai, o po to buvo siekiama rasti tarpusavio susitarimą kuriant paprasčiausią matematinį modelį, kuris galėtų realistiškai prognozuoti vienaarūšio dumblo teršalų šalinimo sistemas, atliekančias nitrifikacijos, denitrifikacijos, anglies oksidacijos darbus. Galutinis darbo rezultatas buvo pristatytas 1987 m. Šiandien šis modelis yra vadinamas aktyvaus dumblo modeliu Nr.1 (2.1 pav.), sutrumpintai ASM1. Nors šis modelis nuo tų laikų buvo modifikuotas ir išplėstas, tačiau originalus modelis yra turbūt vienas iš labiausiai naudojamų modelių visame pasaulyje, norint aprašyti vandens valymo procesus [11,13,15].

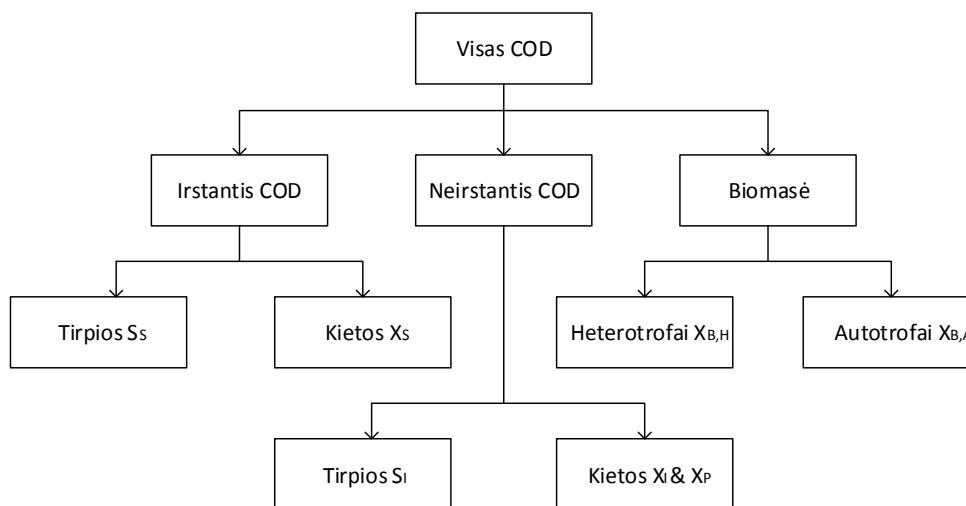


2.1 pav. ASM1 proceso struktūra [17]

2.1.1 Būsenos kintamieji – COD komponentai ASM1 modelyje

Anglies medžiaga ASM1 modelyje yra skirstoma į yrantį COD, neyrantį COD ir biomasę (2.2 pav.). Tirpios dalelės yra žymimos S , o kietosios dalelės – X . Biologiškai yrantis COD yra skirstomas į lengvai skylantį substratą S_s ir lėtai yrantį substratą X_s . Yra laikoma, kad lengvai yrantis substratas yra sudarytas iš paprastų tirpių molekulių, kurias organizmai gali greitai absorbuoti ir panaudoti energijai ir sintezei. Tuo tarpu yra laikoma, kad lėtai yrantis substratas yra sudarytas iš kietų, sudėtingų organinių molekulių, kurioms reikalinga fermentacija prieš jas panaudojant ir absorbuojant. Dalis lėtai yrančio substrato gali būti tirpus, tačiau modelyje jis yra laikomas kieta medžiaga. Biologiškai neyrantis COD yra skirstomas į tirpią S_I ir kietą X_I medžiagas. Yra laikoma, kad šios abi medžiagos nėra veikiamos biologinių procesų, vykstančių

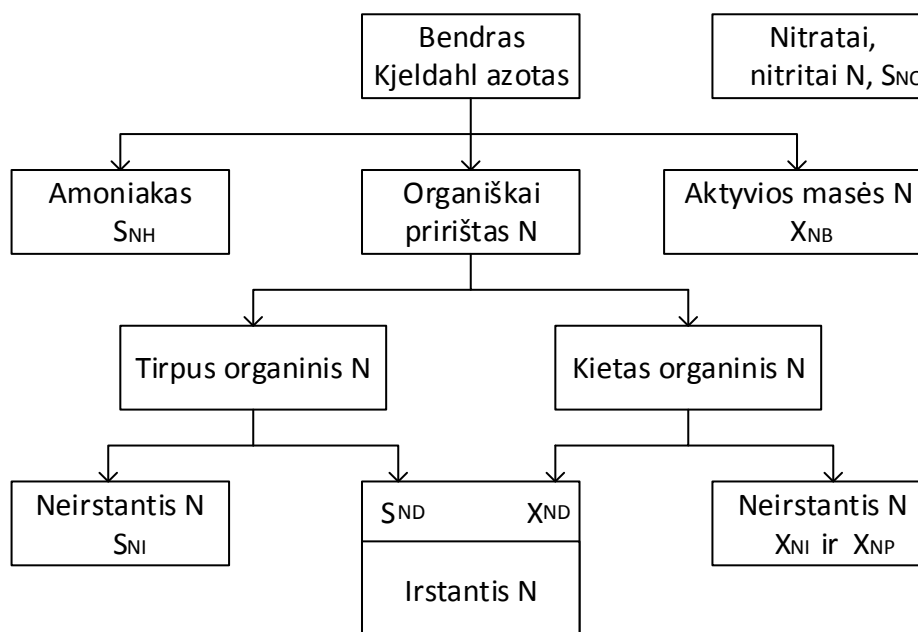
sistemoje. Inertiška tirpi medžiaga iš sistemos yra pašalinama per antrinio sėsdintuvo nutekamuosius vandenį, kai tuo tarpu inertiškos kietos dalelės lieka bendroje dumblo masėje. Inertiškos kietos dalelės iš sistemos yra pašalinamos kartu su pertekliniu dumblu. Aktyvi biomasa yra išskaidoma į du organizmų tipus: heterotrofinę biomasę ($X_{B,H}$) ir autotrofinę biomasę ($X_{B,A}$). Papildomas būsenos kintamasis (X_P) yra naudojamas inertiškų kietųjų produktų, atsirandančių iš biomasės nykimo, modeliavimui. Dėl praktiškumo X_I ir X_P gali būti sujungti į vieną kintamąjį [11,13,15].



2.2 pav. COD komponentai ASM1 modelyje

2.1.2 Būsenos kintamieji – azoto ir kiti komponentai ASM1 modelyje

ASM1 modelyje azoto medžiagos nuotekose yra skirstomos remiantis pateikta schema (2.3 pav.). Bendrasis Kjeldahl azotas (*total Kjeldahl nitrogen*) yra skirstomas į amoniako azotą (S_{NH}), organiškai surištą, ir aktyvios masės (*active mass*) azotą, kuris yra biomasės dalis ir yra laikomas azotu. Organinis azotas yra skirstomas į tirpias ir kietas frakcijas, kurios savo ruožtu gali būti yrančios arba neyrančios. Tik kietos skaidomos organinės azoto dalelės (X_{ND}) ir tirpus biologiškai yrantis organinis azotas (S_{ND}) yra naudojami modelyje. X_{NP} ir X_{NI} gali būti lengvai apskaičiuojami, tačiau nėra aprašyti modelyje. Nitratai ir nitritų azotas yra sujungti į vieną kintamąjį, taip supaprastinant modelį. Paskutiniai du komponentai, aprašomi ASM1 modelyje, yra ištirpusio deguonies koncentracija (S_O) ir šarmingumas (S_{ALK}). Šarmingumas neturi įtakos jokiems kitiems modelyje vykstantiems procesams [11,13,15].



2.3 pav. Azoto kintamieji ASM1 modelyje

2.1.3 Dinaminiai procesai

Aerobinis heterotrofinės biomasės augimas $X_{B,H}$: dalis lengvai yrančio substrato (S_S) yra naudojama heterotrofinės biomasės augimui. Augimas yra modeliuojamas naudojant Monod kinetiką. Amoniakas yra naudojamas azoto sintezei. S_S ir S_O koncentracijos gali stabdyti augimo procesą. Šis procesas daugiausia prisideda prie naujos biomasės gamybos ir COD pašalinimo. Jis taip pat susijęs su šarmingumo pasikeitimais.

Anoksinis heterotrofinis biomasės augimas (denitrifikacija): anoksinėje aplinkoje heterotrofiniai organizmai skaido nitratus. Šio proceso metu vyksta heterotrofinės biomasės augimas ir azoto dujų gamyba (denitrifikacija). Yra naudojamos tos pačios Monod kinetikos lygtys kaip ir aerobiniam augimui, tačiau kinetikos greičio išraiška yra padauginta iš faktoriaus $\eta_g (<1)$. Šis sumažintas greitis gali būti dėl mažesnio maksimalaus augimo greičio esant anoksinėms sąlygoms arba dėl to, kad tik dalis heterotrofinės biomasės turi galimybę panaudoti nitratus kaip elektronų akceptorius. Amoniakas yra panaudojamas kaip azoto šaltinis naujos biomasės gamybai.

Aerobinis autotrofinės biomasės ($X_{B,A}$) augimas (nitrifikacija): nitrifikacijos metu amoniakas yra oksiduojamas į nitratus ir dėl to didėja autotrofinės biomasės koncentracija bei deguonies sunaudojimas. Amoniakas taip pat yra naudojamas kaip azoto šaltinis naujos biomasės gamybai. Procesas turi ženklią poveikį šarmingumui (dėl amoniako vartimo į biomasę ir amoniako oksidacijos į nitratus) ir bendram deguonies sunaudojimui. Augimo greitis taip pat yra modeliuojamas naudojant Monod kinetiką.

Heterotrofinės biomasės nykimas: procesas yra modeliuojamas remiantis irimo-regeneracijos (*death-regeneration*) hipoteze, kuri nusako, kad ląstelių irimo metu dalis susidarancios medžiagos tampa inertiška (nepanaudojama), o dalis tampa biologiškai yrančiu substratu. Organizmai miršta tam tikru greičiu ir dalis to proceso metu susidarancių medžiagų yra laikomos neyrančiomis bei yra pridedamos prie X_P . Likusi dalis medžiagų prisideda prie lėtai yrančio substrato X_S . Yra priimta, kad procesas vyksta tokiu pačiu greičiu, esant aerobinėms, anoksinėms ir anaerobinėms sąlygoms. Autotrofinės biomasės nykimas yra modeliuojamas tokiu pat būdu kaip aukščiau aprašytas heterotrofų nykimas.

Kietos organikos hidrolizė: dumblo masėje esantis lėtai yrantis substratas (X_S) yra išoriškai suskaidomas ir šio proceso metu gaunamas greitai yrantis substratas S_S , kuris panaudojamas mikroorganizmų augimui. Procesas yra modeliuojamas remiantis paviršiaus kinetikos reakcijos lygtimis ir vyksta tik aerobinėmis ir anoksinėmis sąlygomis. Hidrolizės greitis yra mažesnis anoksinėmis nei aerobinėmis sąlygomis per faktorių $\eta_h (<1)$.

Kieto organinio azoto hidrolizė: yrantis kietas organinis azotas yra skaidomas į tirpų organinį azotą tokiu greičiu, kurį nusako kietos organikos hidrolizės reakcija [11].

2.1.4 Modelio lygtys

Remiantis literatūra [11,17,22] yra pateikiamos proceso diferencialinės lygtys.

Heterotrofinės biomasės koncentracijos dinamikai įtakos turi aerobinis augimas, anoksinis augimas ir irimas:

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) X_{B,H} + \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} - b_H X_{B,H} \quad (5)$$

Autotrofinės biomasės koncentracijos kitimui įtakos turi aerobinis augimas ir puvimas. Proceso dinamika yra paprastesnė, nes autotrofai neauga anoksinėje aplinkoje:

$$\frac{dX_{B,A}}{dt} = \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A} - b_A X_{B,A} \quad (6)$$

Greitai yrančio substrato koncentracija mažėja augant heterotrofinėms bakterijoms (aerobinėje ir anoksinėje aplinkose) ir didėja lėtai yrančio substrato hidrolizės metu. Šiuos procesus aprašo žemiau pateikta diferencialinė lygtis:

$$\frac{dS_S}{dt} = -\frac{1}{Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) X_{B,H} - \frac{1}{Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right)$$

$$\eta_g X_{B,H} + k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} \quad (7)$$

Lėtai yrančio substrato koncentracija didėja dėl bakterijų irimo, o jos mažėjimui įtakos turi hidrolizės procesai:

$$\frac{dX_S}{dt} = (1 - f_P)(b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) - k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} \quad (8)$$

Smulkūs inertiški produktai atsiranda dėl autotrofinių ir heterotrofinių bakterijų irimo. Šiuos procesus aprašo žemiau pateikta lygtis:

$$\frac{dX_P}{dt} = f_P b_H X_{B,H} + f_P b_A X_{B,A} \quad (9)$$

Kietųjų dalelių organinio azoto koncentracija didėja heterotrofų ir autotrofų irimo metu ir mažėja hidrolizės metu:

$$\frac{dX_{ND}}{dt} = (i_{XB} - f_P i_{XP})(b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) - k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} (X_{ND}/X_S) \quad (10)$$

Tirpaus organinio azoto koncentracijai įtakos turi organinio azoto virtimas į amonį ir hidrolizės procesai:

$$\frac{dS_{ND}}{dt} = -k_a S_{ND} X_{B,H} + k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} (X_{ND}/X_S) \quad (11)$$

Amonio koncentracija priklauso nuo visų mikroorganizmų augimo. Vykstant nitrifikacijos procesams amonio koncentracija mažėja ir didėja vykstant tirpaus organinio azoto amonifikacijos procesams:

$$\frac{dS_{NH}}{dt} = -i_{XB} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) X_{B,H} - i_{XB} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A} \right) \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A} + k_a S_{ND} X_{B,H} \quad (12)$$

Nitratų koncentracijai įtakos turi du procesai: didėjimui – nitrifikacija, mažėjimui – denitrifikacija. Dinaminiai procesai aprašomi žemiau pateiktoje lygtyje:

$$\begin{aligned} \frac{dS_{NO}}{dt} = & -\frac{1-Y_H}{2.86Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} \\ & + \frac{1}{Y_A} \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A} \end{aligned} \quad (13)$$

Deguonies koncentracija nuotekose mažėja dėl aerobinio heterotrofinės ir autotrofinės biomasės augimo:

$$\frac{dS_O}{dt} = -\frac{1-Y_H}{Y_H} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) X_{B,H} - \frac{4.57-Y_A}{Y_A} \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A} \quad (14)$$

Anoksinio heterotrofų augimo ir tirpių organinių junginių nitrifikacijos metu proceso šarmingumas didėja, o dėl aerobinio heterotrofų ir autotrofų augimo šarmingumas mažėja:

$$\begin{aligned} \frac{dS_{ALK}}{dt} = & -\frac{i_{XB}}{14} \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O} \right) X_{B,H} + \left(\frac{1-Y_H}{14*2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14} \right) \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S+S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O} \right) \\ & \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} - \left(\frac{i_{XB}}{14} + \frac{1}{7Y_A} \right) \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O} \right) X_{B,A} + \frac{1}{14} k_a S_{ND} X_{B,H} \end{aligned} \quad (15)$$

Sudarant antrinio sėsdintuvo imitatorių, diferencialinės lygtys yra sudaromos atskirai skystoms ir netirpioms frakcijoms. Skystų frakcijų koncentracijos būsenos lygtys užrašomos taip:

$$\frac{dS}{dt} = S_{in} \frac{Q_0+Q_{gr}}{V} - x \frac{Q_{nusaus}+Q_{išval}+Q_{gr}}{V} \quad (16)$$

Iš šios lygties: S_{in} – atitinkamos skystos frakcijos koncentracija, Q_0 , Q_{gr} , Q_{nusaus} ir $Q_{išval}$ – atitinkamai įtekančio, gražinamo, perteklinio ir išvalytų nuotekų srautai, V – nusėsdintuvo tūris.

Inertiškoms ir netirpioms medžiagoms diferencialinės lygtys užrašomos taip:

$$\frac{dX}{dt} = X_{in} \frac{Q_0+Q_{gr}}{V} - x \frac{Q_{nusaus}+Q_{gr}}{V} - x \frac{Q_{išval}}{V} koef \quad (17)$$

Iš čia: X_{in} – atitinkamos medžiagos koncentracija, x – atitinkamos medžiagos būvio kintamasis, $koef$ – koeficientas, kuris parodo kuri medžiagos dalis yra pašalinama iš nusėsdintuvo per nutekamuosius vandenius.

Modelyje priimta, kad bendras, į anoksinis rezervuarą įtekančias srautas $Q_{in} = Q_0 + Q_{rec} + Q_{gr}$. Laikoma, kad įtekančių ir ištekančių nuotekų srautas yra toks pat visose kamerose. Kiekvienos medžiagos pradinė koncentracija yra apskaičiuojama pagal šią lygtį:

$$X_{0,in} = \frac{X_0 Q_0 + X_{rec} Q_{rec} + X_D Q_{gr}}{Q_0 + Q_{rec} + Q_{gr}} \quad (18)$$

Iš šios lygties: X_0 – pradinė atitinkamos medžiagos koncentracija įtekančiuose nuotekose, X_{rec} – medžiagos, esančios recirkuliaciniame sraute, koncentracija, X_D – medžiagos koncentracija grąžinamame sraute iš sėsdintuvo.

Imitacinio modelio aeruojamose kamerose deguonies pernešimui prie (14) lygties pridedamas narys $K_L a(u)(S_{O,sat} - S_O)$. Iš čia $K_L a(u)$ – deguonies pernešimo funkcija, u – oro tūrio srauto greitis, o $S_{O,sat}$ – prisotinimo ištirpusiu deguonimi koncentracija.

Medžiagų sąrašas (būsenos kintamųjų) pateiktas 2.1 lentelėje:

2.1 lentelė. Proceso kintamųjų sąrašas [16]

Žymėjimas	Paaiškinimas
S_{NH} (t)	Tirpus amonis, azotas
S_{NO} (t)	Tirpus nitratas, azotas
S_{ND} (t)	Tirpus biologiškai yrantis organinis azotas
S_O (t)	Ištirpęs deguonis
S_S (t)	Lengvai skylantis substratas
$X_{B,A}$ (t)	Autotrofinė biomasė
$X_{B,H}$ (t)	Heterotrofinė biomasė
X_{ND} (t)	Organinis azotas
X_S (t)	Lėtai yrantis substratas
X_P (t)	Inertiški smulkūs produktai
S_{ALK} (t)	Šarmingumas

Biologinių parametų vertės, naudojamos modelyje esant 15 laipsnių temperatūrai, pateiktos 2.2 ir 2.3 lentelėse:

2.2 lentelė. Stechiometriniai proceso parametrai [16,17]

Parametrai	Žymėjimas	Vertės
Y_A	Autotrofinės biomasės našumo koeficientas	0.24
Y_H	Heterotrofinės biomasės našumo koeficientas	0.67
f_p	Biomasės virtimo į netirpius produktus koeficientas	0.08
i_{XB}	Azoto ir COD masių santykis biomasėje	$0.08 \text{g N}(\text{g COD})^{-1}$

i_{XP}	Azoto ir COD masių santykis, produktuose susidarančiuose iš biomasės irimo	$0.06 \text{ g N}(\text{g COD})^{-1}$
----------	--	---------------------------------------

2.3 lentelė. Kinetiniai proceso parametrai [16,17]

Parametrai	Žymėjimas	Vertės
μ_H	Heterotrofinių mikroorganizmų maksimalus specifinis augimo greitis	4.0 diena^{-1}
K_S	Heterotrofinių mikroorganizmų dalinio įsotavimo koeficientas	$10.0 \text{ g COD m}^{-3}$
$K_{O,H}$	Deguonies dalinio įsotavimo koeficientas heterotrofinėje biomasėje	$0.2 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$
K_{NO}	Nitratų dalinio įsotavimo koeficientas denitrifikuojant heterotrofinius mikroorganizmus	$0.5 \text{ g NO}_3\text{N m}^{-3}$
b_H	Irimo greičio koeficientas heterotrofiniams mikroorganizmams	0.3 diena^{-1}
η_g	Heterotrofų augimo anoksinėmis sąlygomis korekcijos koeficientas	0.8
η_h	Hidrolizės korekcijos koeficientas esant anoksinėms sąlygoms	0.8
k_h	Maksimalus savitasis hidrolizės greitis	$3.0 \text{ g COD (g COD)}^{-1}$
K_X	Lėtai biologiškai skaidomo substrato hidrolizės prisotavimo koeficientas	$0,1 \text{ g COD (g COD)}^{-1}$
μ_A	Autotrofinių mikroorganizmų maksimalus specifinis augimo greitis	0.5 diena^{-1}
K_{NH}	Amonio dalinio įsotavimo koeficientas autotrofinėje biomasėje	$1.0 \text{ g NH}_3\text{N m}^{-3}$
b_A	Irimo greičio koeficientas autotrofiniams mikroorganizmams	0.05 diena^{-1}
$K_{O,A}$	Deguonies dalinio įsotavimo koeficientas autotrofinėje biomasėje	$0.4 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3}$
k_a	Amonio susidarymo greitis	$0.05 \text{ m}^3 \text{ (g COD diena)}^{-1}$

2.1.5 Apribojimai modelyje

Tam, kad ASM1 imitacinį modelį būtų galima praktiškai panaudoti, jis yra supaprastintas ir jam taikomos šios prielaidos:

- imitaciniame modelyje temperatūra yra pastovi;
- pH modelyje yra pastovus ir artimas neutraliam;
- neatsižvelgiama į tai, kad modelyje gali pasikeisti organinių medžiagų sudėtis (pvz. lengvai yrantis substratas). Todėl yra laikoma, kad reakcijų greičių koeficientai yra pastovūs;
- modelyje nėra atsižvelgiama į galimą azoto, fosforo ir kitų neorganinių medžiagų poveikį organinio substrato šalinimui ir ląstelių augimui;
- denitrifikacijos pataisos koeficientai η_g ir η_h yra pastovūs tam tikroms nuotekoms;
- nitrifikacijos koeficientai yra pastovūs;
- heterotrofinė biomasė yra homogeniška ir jokie mikroorganizmų rūšies pasikeitimai laikui bėgant nevyksta;
- kietos organinės medžiagos biomasėje atsiranda akimirksniu.

2.2 Teršalų koncentracijos skaičiavimai

Nuotekų valymo įrenginiams yra keliami griežti aplinkosaugos reikalavimai, todėl ištekamųjų nuotekų koncentracijos negali viršyti leistinų normų. Bendras azoto kiekis (N) negali būti didesnis nei 18 mg/l. Tirpaus amonio koncentracija (S_{NH}) negali viršyti 4 mg/l. Cheminio deguonies suvartojimo (COD) leistina norma yra 100 mg/l. Biocheminio deguonies sunaudojimo (BOD) leistina norma – 10 mg/l [5].

Leistinos ištekamųjų nuotekų koncentracijos apskaičiuojamos pagal literatūroje pateiktas formules [5].

Bendras azoto kiekis: $N = S_{NO} + S_{NK}$, kur S_{NK} lygus:

$$S_{NK} = S_{NH} + S_{ND} + X_{ND} + i_{XB}(X_{B,H} + X_{B,A}) + i_{XP}X_P \quad (19)$$

Biocheminis deguonies sunaudojimas apskaičiuojamas:

$$BOD = 0,25 * (S_S + X_S + (1 - f_p) * (X_{B,H} + X_{B,A})) \quad (20)$$

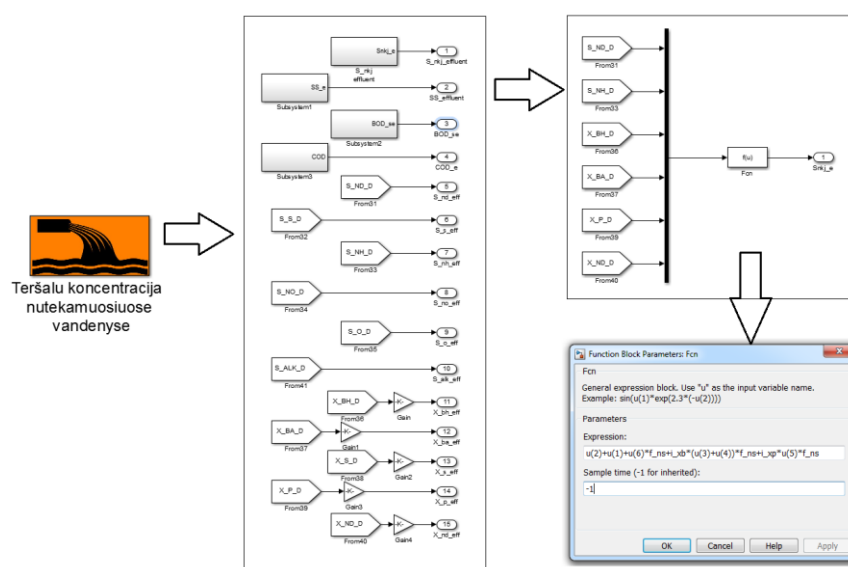
Lengvai skaidomas substratas SS apskaičiuojamas:

$$SS = 0,75 * (X_S + X_{B,H} + X_{B,A} + X_P) \quad (21)$$

Cheminis deguonies sunaudojimas COD apskaičiuojamas:

$$COD = S_S + X_S + X_{B,H} + X_{B,A} + X_P \quad (22)$$

Imitacinis modelis Matlab/Simulink aplinkoje yra patobulinamas sudarant nutekamųjų vandenų teršalų skaičiavimų modelį pagal aukščiau pateiktas lygtis. Principinė schema pateikta 2.4 pav.



2.4 pav. Teršalų skaičiavimo modelis Matlab/Simulink aplinkoje

2.3 Modelio tobulinimas ir modeliavimo eksperimentų metodologija

Iš ankstesnių metų buvo gautas nesutvarkytas, neveikiantis proceso imitacinis modelis, kuris aprašytas Matlab/Simulink aplinkoje. Imitacinis modelis buvo pertvarkytas, proceso parametrus įvesti vėlavimai ir apribojimai. Pagal literatūroje [7] pateiktą informaciją, modelyje įvedamos pradinės proceso sąlygos (1 priedas). Su šiomis sąlygomis modelis simuliuojamas tol, kol gaunamos naujos, nusistovėjusios proceso reikšmės (4 priedas). Gautos vertės užfiksuojamos ir naudojamos kaip pradinės tolimesniems proceso eksperimentams. Proceso parametrai, gauti šiame taške, laikomi nominaliais. Įtekantis nuotekų srautas nominalaus taško aplinkoje yra 768 m³/h. Gavus nusistovėjusius proceso parametrus, šuoliškai buvo keičiamas paduodamas oro srautas į aeruojamus reaktorių. Iš viso atlikti 6 eksperimentai, kurių metu oro srautas buvo keičiamas ±5%,

$\pm 10\%$, $\pm 15\%$ nuo pradinės nusistovėjusios oro srauto reikšmės. Kiekvieno eksperimento metu fiksuojama ištirpusio deguonies koncentracija antrajame aeruojamame reaktoriuje. Gautos reakcijos kreivės aproksimuojamos pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu:

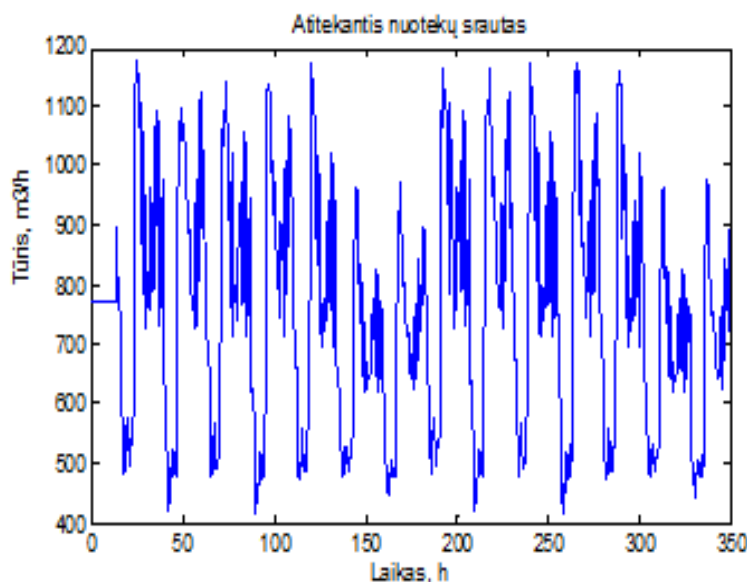
$$W_{pr}(s) = \frac{K_{pr}}{T_{pr}s+1} e^{-\tau_{pr}s} \quad (23)$$

Iš čia: K_{pr} – proceso stiprinimo koeficientas, T_{pr} – atstojamoji laiko pastovioji, τ_{pr} – atstojamoji vėlavimo trukmė, s – Laplaso operatorius.

Iš gautų reakcijos kreivių regulatoriaus parametrai apskaičiuojami pagal vieną iš Ziegler ir Nichols derinimo metodų modifikacijų. Gauti modeliavimo rezultatai pateikiami tyrimo rezultatų dalyje, 3.1 skyriuje.

2.4 Adaptacijos (*gain scheduling*) algoritmo sudarymo metodika

Remiantis [13, 17, 22] literatūra, įtekančių nuotekų srautas yra vienas pagrindinių trikdžių, kuris turi didelę įtaką ištirpusio deguonies koncentracijai. Todėl nuspręsta iširti, ar šiam procesui yra tikslinga taikyti regulatoriaus parametrų adaptaciją pagal įtekančių nuotekų srautą. Literatūroje [17] yra pateikiami duomenys, kaip įtekančių nuotekų srautas kinta realioje sistemoje.



2.5 pav. Įtekančių nuotekų srauto pokyčiai realioje sistemoje. Pateikiamas dviejų savaičių periodas.

Stiprinimo numatymo algoritmo sudarymui iš 2.5 pav. pateikto įtekančių nuotekų srauto diapazono yra parenkami septyni papildomi lokaliniai taškai, kuriuose įtekančių nuotekų srautas: 416 m³/h, 583 m³/h, 667 m³/h, 833 m³/h, 875 m³/h, 1000 m³/h ir 1125 m³/h.

Nominalaus taško aplinkoje (768 m³/h) yra atliekami septyni eksperimentai. Kiekvieno eksperimento metu šuoliškai keičiamas įtekančių nuotekų srautas tokiu diapazonu, kad būtų pasiekiamos aukščiau nurodytos lokalaus taško reikšmės. Šuoliškai pakeitus įtekančių nuotekų koncentraciją, procesas yra simuliuojamas tol, kol visi proceso parametrai tampa pastovūs. Gautos naujos reikšmės kiekvieno eksperimento metu užfiksuojamos ir naudojamos tolimesniems eksperimentams atitinkamo lokalaus taško aplinkoje. Gavus lokalių darbo taškų nusistovėjusius parametrus, kiekvieno iš šių taškų aplinkoje atliekamas vienas eksperimentas, kurio metu šuoliškai +10% keičiamas oro srautas paduodamas į aeruojamus reaktorių. Gautos reakcijos kreivės aproksimuojamos pirmos eilės perdavimo funkcija su vėlavimu. Kiekviename lokaliame taške reguliatorių parametrai apskaičiuojami pagal Ziegler ir Nicholson modifikacijas, ISE, IAE (nuostatui ir trikdžiui), ITAE (nuostatui ir trikdžiui), vidinio modelio valdymo (IMC) derinimo metodus ir pateikti 2 priede. Kadangi geriausi rezultatai gauti naudojant IAE, ITAE ir IMC derinimo metodus, todėl jie ir yra pateikiami rezultatų dalyje.

Stiprinimo numatymo algoritmo realizavimui yra naudojami reguliatorių derinimo parametrai, kurie gauti lokaliuose taškuose. Jie yra aproksimuojami antros eilės polinominiu modeliu ir taip gaunamos funkcinės priklausomybės tarp įtekančių nuotekų srauto ir PI reguliatoriaus parametrų. Matlab/Simulink aplinkoje stiprinimo numatymo algoritmas yra realizuojamas sudarant tolydinį PI reguliatorių.

3. MODELIAVIMO EKSPERIMENTŲ REZULTATAI

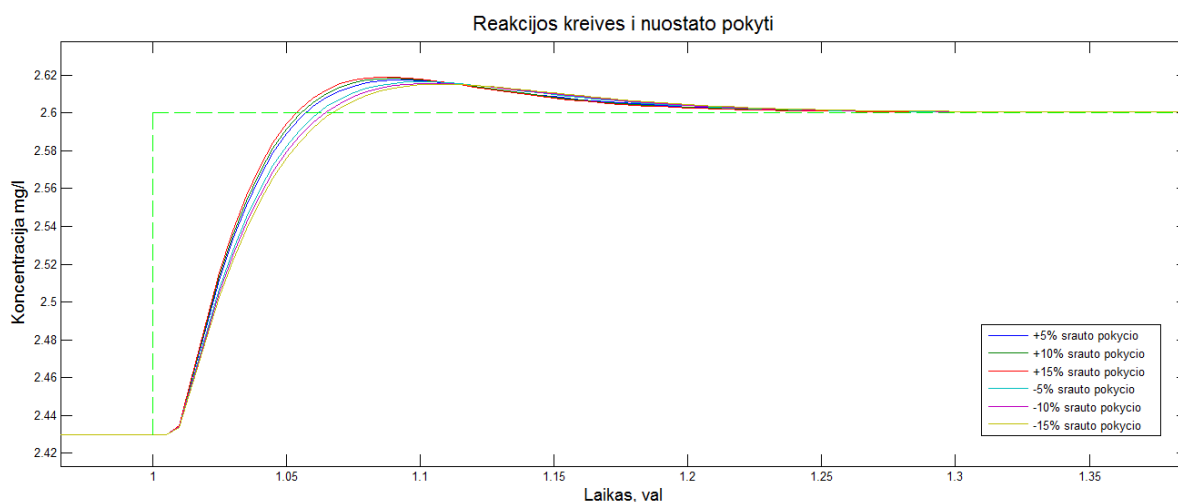
3.1 Ištirpusio deguonies koncentracijos ARS tyrimas

Sutvarkius imitacinį modelį bei gavus nusistovėjusius, nominalaus taško proceso parametrus, modelio veikimo patikrinimui buvo nuspręsta sudaryti ištirpusio deguonies koncentracijos automatinio reguliavimo sistemą (ARS). Nominaliame taške buvo šuoliškai $\pm 5, 10, 15\%$ keičiamas oro srautas, paduodamas į aeruojamus rezervuarus. Iš gautų reakcijos kreivių analiziniu metodu buvo apskaičiuoti PI reguliatorių parametrai, kurie yra pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. PI reguliatorių parametrai esant skirtingam oro srauto pokyčiui

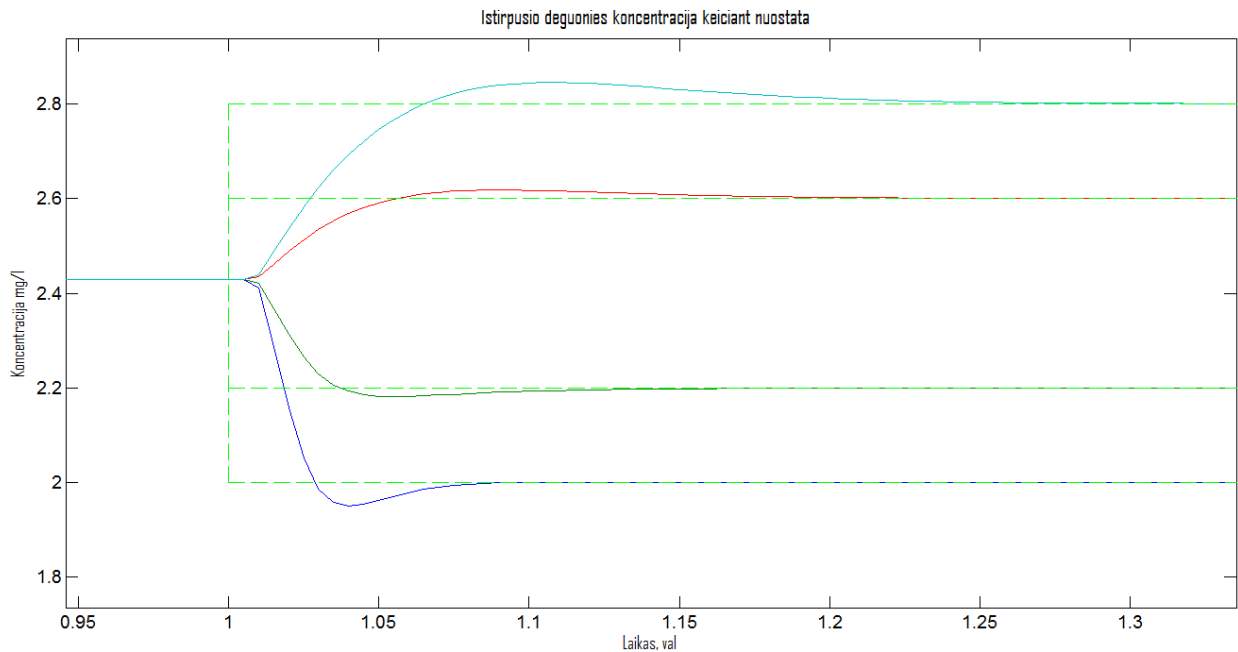
	Oro srauto pokytis %					
	+5%	+10%	+15%	-5%	-10%	-15%
τ	0.02					
K_r	18202	18603	19143	16965	16465	15922
T_i	0.1042	0.1031	0.1025	0.1045	0.1054	0.1057

Panaudojant gautų reguliatorių parametrus buvo sumodeliuotos šešios reakcijų kreivės į 2.6 mg/l ištirpusios deguonies koncentracijos nuostatą (3.1 pav.).



3.1 pav. Pereinamojo proceso kreivės į nuostato pokytį nominaliame darbo taške ($Q_{in} = 768 \text{ m}^3/\text{h}$)

Siekiant patikrinti, kaip valdymo sistema reaguoja į skirtingus nuostatus, buvo naudojami +10% srauto pokyčio reguliatoriaus parametrai. Buvo pasirinktos keturios skirtingos ištirpusios deguonies koncentracijos reikšmės t. y. 2 mg/l, 2.2 mg/l, 2.6 mg/l, 2.8 mg/l. Gautos reakcijos kreivės pateiktos 3.2 pav.

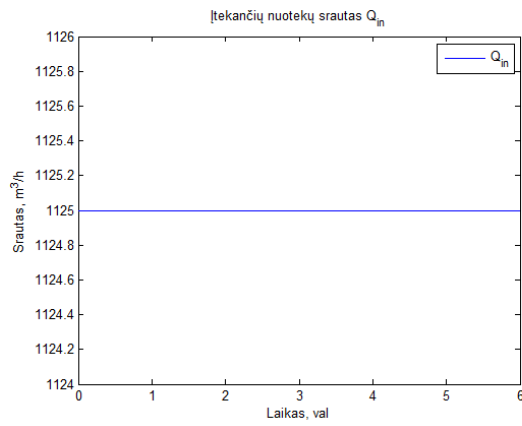


3.2 pav. +10% srauto pokyčio regulatoriaus pereinamojo proceso kreivės į nuostato pokyčius nominaliame darbo taške ($Q_{in} = 768 \text{ m}^3/\text{h}$)

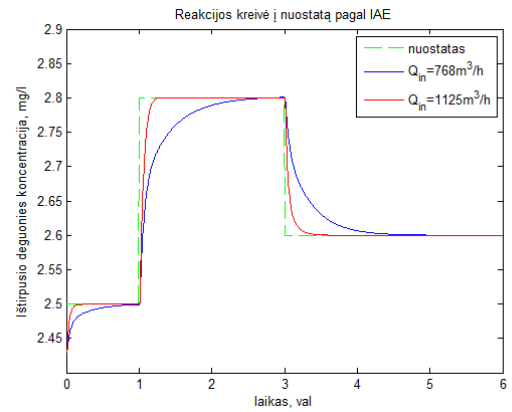
Iš gautų modeliavimo rezultatų matyti, kad imitacinis modelis veikia ir valdymo sistema palaiko užduotus ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatus esant pastoviams proceso parametrams. Toliau imitacinis modelis yra naudojamas adaptacijos algoritmo sudarymui pagal įtekančių nuotekų srautą.

3.2 Sistemos reakcijos į nuostato pokytį tyrimas lokaliame darbo taške

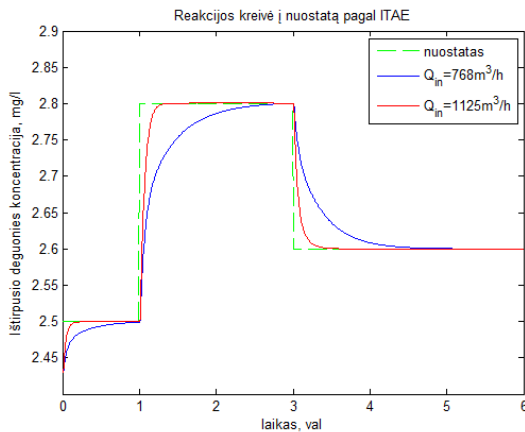
Siekiant palyginti, kaip imitacinis modelis lokaliame taške ($Q_{in} = 1125 \text{ m}^3/\text{h}$) reaguoja į šuolinį ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato pokytį yra naudojami reguliatorių derinimo parametrai, kurie suderinti lokaliame ($Q_{in} = 1125 \text{ m}^3/\text{h}$) bei nominaliame taškuose ($Q_{in} = 768 \text{ m}^3/\text{h}$). Reakcijos kreivių palyginimui panaudoti regulatoriaus parametrai, kurie suderinti pagal IAE ir ITAE (nuostato sekimui) bei vidinio modelio derinimo taisyklės. Įtekančių nuotekų koncentracija šio eksperimento metu yra pastovi (3.3 pav.). Iš 3.3 ir 3.4 paveikslų matyti, kad reakcijos kreivės su lokalaus taško (kuriame yra atliekamas eksperimentas) regulatoriaus parametrais akivaizdžiai greičiau pasiekia užduotą ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatą, nei naudojant nominalaus taško regulatoriaus parametrus. Reguliavimo trukmė, naudojant lokalaus taško regulatoriaus derinimo parametrus, kuomet ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatas kinta iš 2,5 mg/l į 2,8 mg/l, yra sumažinama 6,7–7 kartus, lyginant su nominalaus taško regulatoriaus derinimo parametrais. Iš 3.4 paveikslo matyti, kad reakcijos kreivės suderintos IAE, ITAE ir IMC derinimo metodais praktiškai sutampa.



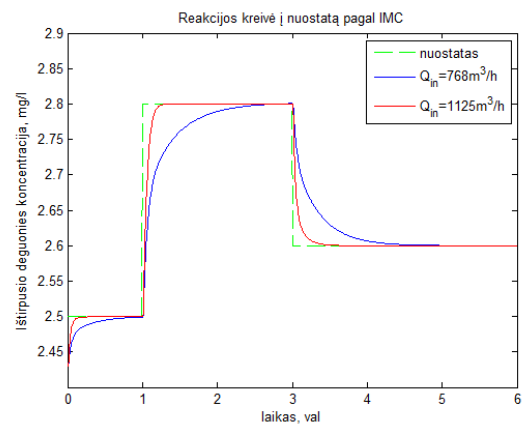
a)



b)

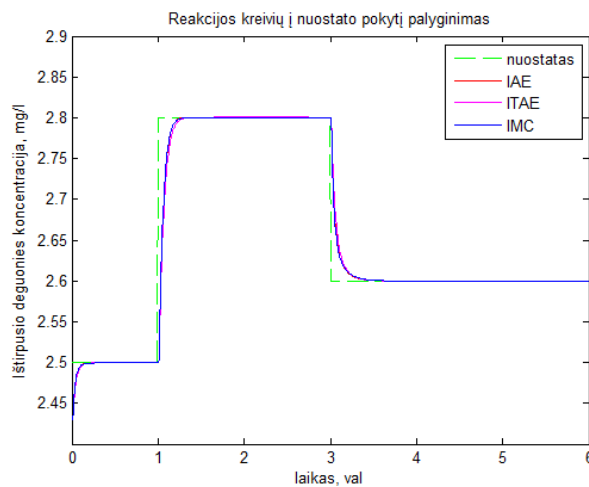


c)



d)

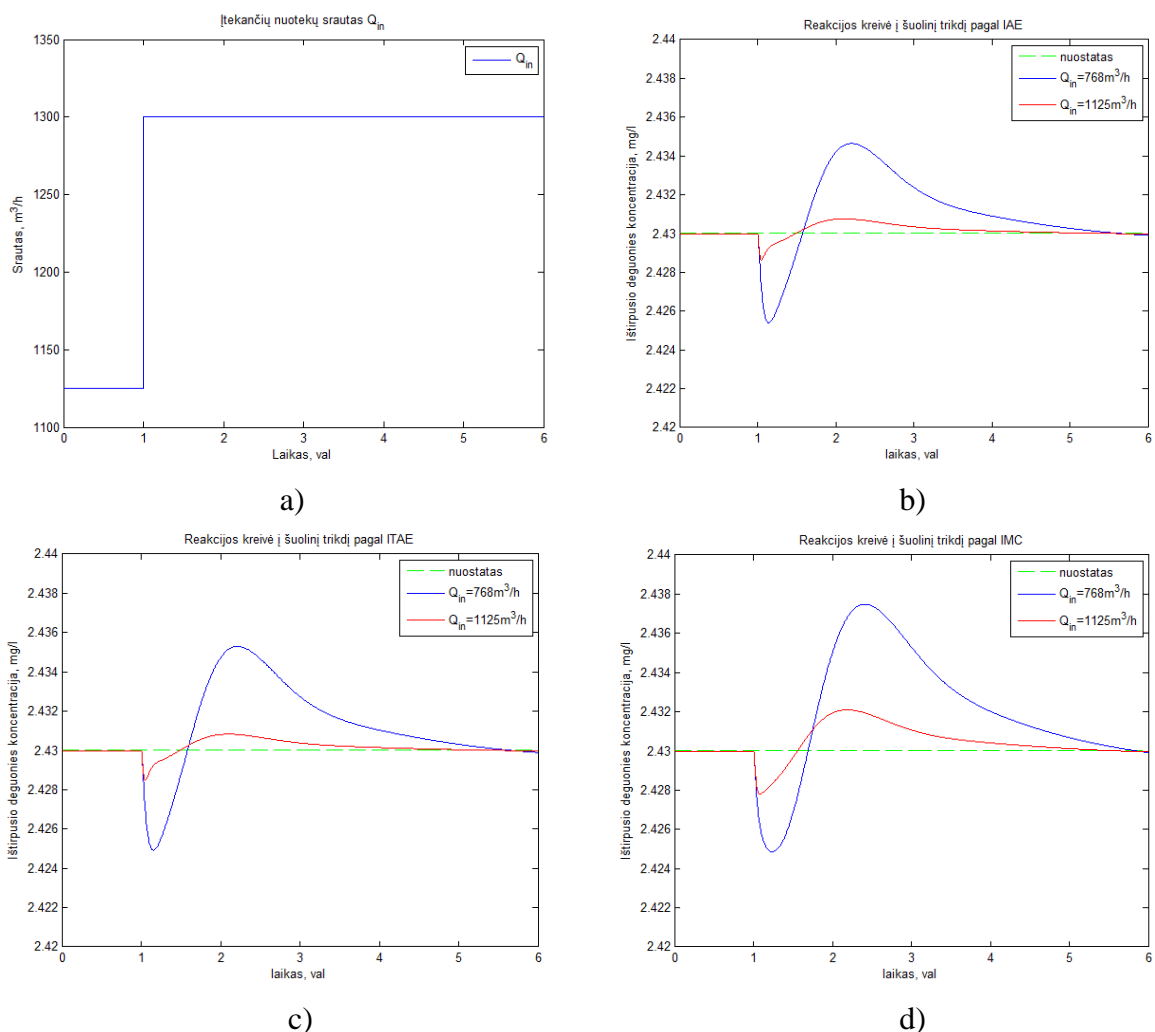
3.3 pav. Sistemos reakcija į nuostato pokytį, esant pastoviam įtekančių nuotekų srautui: a – įtekančių nuotekų srautas; b – sistemos reakcija, naudojant IAE derinimo parametrus; c – sistemos reakcija, naudojant ITAE derinimo parametrus; d – sistemos reakcija, naudojant IMC derinimo parametrus; b, c ir d schemose $Q_n = 768 m^3/h$ – nominalaus taško regulatoriaus parametrai, o $Q_n = 1125 m^3/h$ – lokalaus taško, kuriame atliekamas eksperimentas, regulatoriaus parametrai.



3.4 pav. Reakcijos kreivių palyginimas su lokalaus taško derinimo parametrais pagal IAE, ITAE ir IMC derinimo metodus

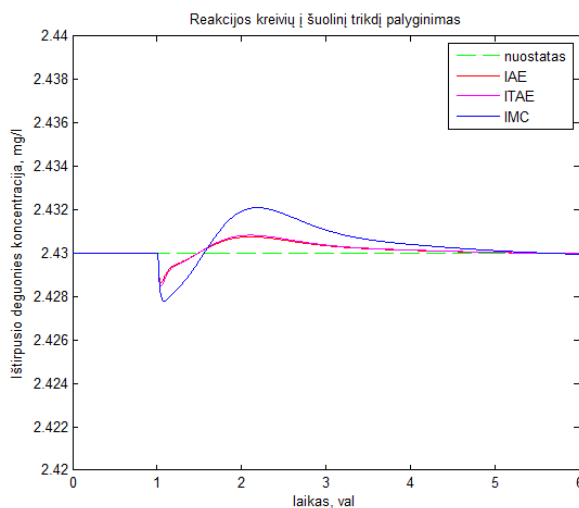
3.3 Sistemos reakcijos į šuolinį trikdantį poveikį tyrimas lokaliame darbo taške

Siekiant iširti, ar yra tikslinga taikyti reguliatoriaus parametrų adaptaciją pagal įtekančių nuotekų srautą, yra atliekamas eksperimentas lokaliame taške, kurio metu yra tikrinama sistemos reakcija į šuolinį trikdį. Šio eksperimento metu yra lyginama, kaip imitacinis modelis lokaliame darbo taške reaguoja į šuolinį įtekančių nuotekų trikdžio pokytį, kuomet yra naudojami reguliatorių derinimo parametrai, suderinti lokaliame ($Q_{in} = 1125 \text{ m}^3/\text{h}$) bei nominaliame taškuose ($Q_{in} = 768 \text{ m}^3/\text{h}$). Naudojami reguliatorių derinimo parametrai suderinti trikdžio kompensavimui pagal IAE ir ITAE kriterijus bei vidinio modelio valdymo taisykles. Šuolinis įtekančių nuotekų trikdys pavaizduotas 3.5 pav. Eksperimento metu ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatas antrojoje aeruojamoje kameroje yra pastovus, t.y. 2.43 mg/l .



3.5 pav. Sistemos reakcija į šuolinį įtekančių nuotekų srauto pokytį: a – įtekančių nuotekų srauto trikdžio profilis; b – sistemos reakcija, naudojant IAE derinimo parametrus; c – sistemos

reakcija, naudojant ITAE derinimo parametrus; d – sistemos reakcija, naudojant IMC derinimo parametrus; b, c ir d schemose $Q_{in}=768 \text{ m}^3/\text{h}$ – nominalaus taško reguliatoriaus parametrai, o $Q_{in}=1125 \text{ m}^3/\text{h}$ – lokalaus taško, kuriame atliekamas eksperimentas, reguliatoriaus parametrai.



3.6 pav. Reakcijos kreivių palyginimas į šuolinį trikdį pagal IAE, ITAE, IMC kriterijus

Kaip matyti iš 3.5 paveikslo, reguliatoriai, suderinti lokaliame darbo taške, geriau kompensuoja trikdantį poveikį su visais trimis derinimo metodais, nei naudojant nominalaus taško reguliatoriaus parametrus. Naudojant IAE ir ITAE derinimo kriterijus, maksimalus dinaminis nuokrypis su lokalaus taško derinimo parametrais yra sumažinamas 70 proc., o naudojant vidinio modelio derinimo taisyklės – 72 proc. Iš 3.6 paveikslo matyti, kad sistemoje naudojant lokalaus taško reguliatoriaus parametrus, suderintus pagal IAE ir ITAE kriterijus, maksimalus dinaminis nuokrypis yra 50 proc. mažesnis nei naudojant vidinio modelio derinimo taisyklės.

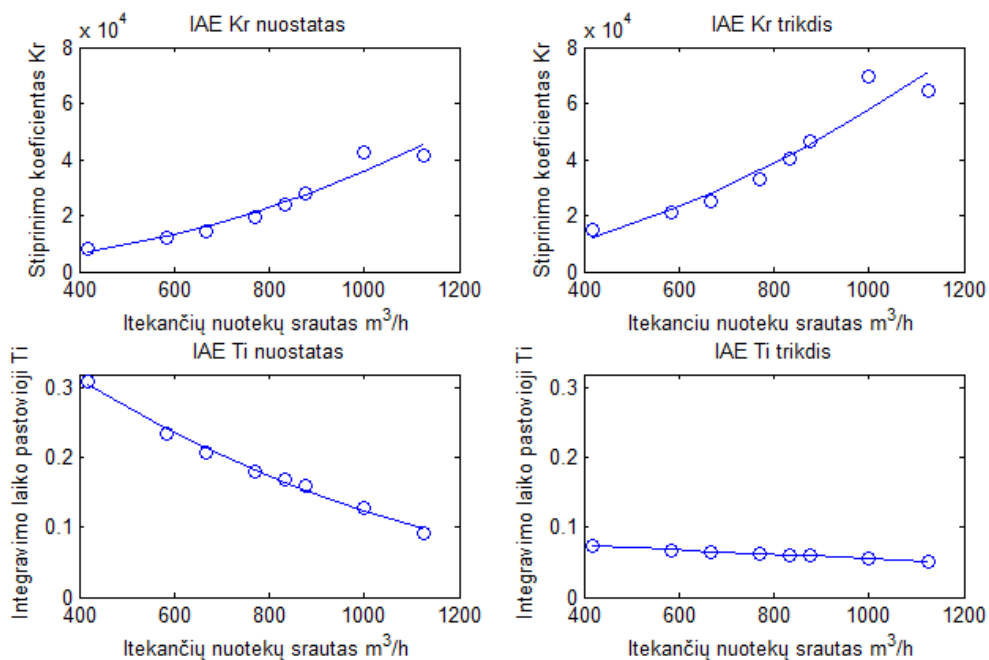
3.4 Adaptacijos algoritmo sudarymas

Iš 3.2 – 3.3 skyriuose gautų modeliavimo rezultatų matyti, kad atliekant eksperimentus lokaliame darbo taške ($Q_{in} = 1125 \text{ m}^3/\text{h}$), kai lyginamos sistemos reakcijos, naudojant lokalaus ir nominalaus taško PI reguliatoriaus parametrus, gaunama:

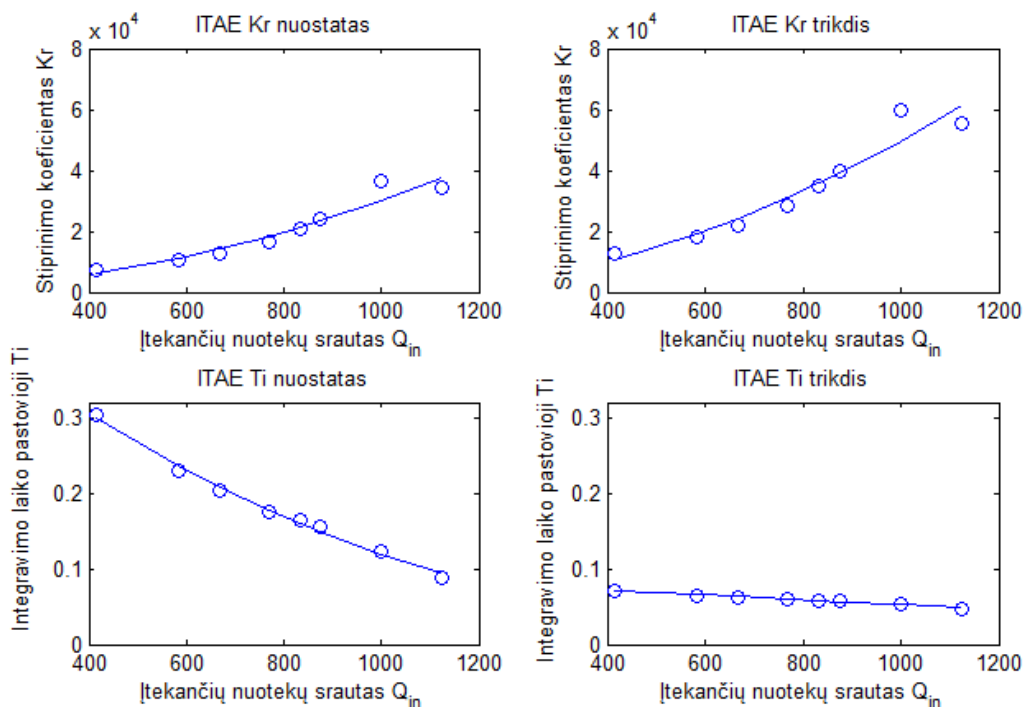
- trumpesnė reguliavimo trukmė šuolinio nuostato ir šuolinio trikdžio eksperimentų metu;
- mažesnis dinaminis nuokrypis šuolinio trikdžio eksperimentu metu.

Remiantis šių eksperimentų rezultatais, galima teigti, kad yra tikslinga taikyti reguliatoriaus parametrų adaptaciją pagal įtekančių nuotekų srautą. Todėl pagal 2.4 skyriuje pateiktą metodologiją yra sudaryti stiprinimo numatymo algoritmai IAE (nuostatui ir trikdžiui), ITAE

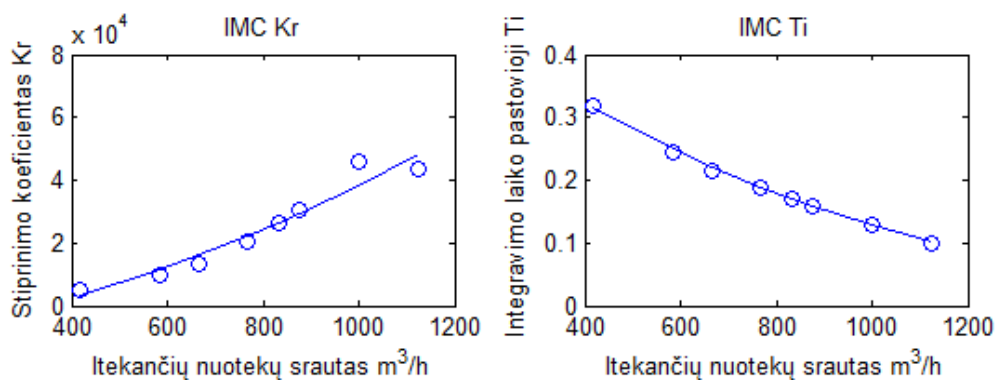
(nuostatui ir trikdžiui) ir IMC reguliatorių derinimo metodams. Gauti modeliavimo rezultatai pateikti 3.7 – 3.9 pav.



3.7 pav. Adaptacijos algoritmai IAE derinimo taisyklėms, suderintoms pagal nuostatą ir trikdantį poveikį



3.8 pav. Adaptacijos algoritmai ITAE derinimo taisyklėms, suderintoms pagal nuostatą ir trikdantį poveikį



3.9 pav. Adaptacijos algoritmas IMC derinimo taisyklėms

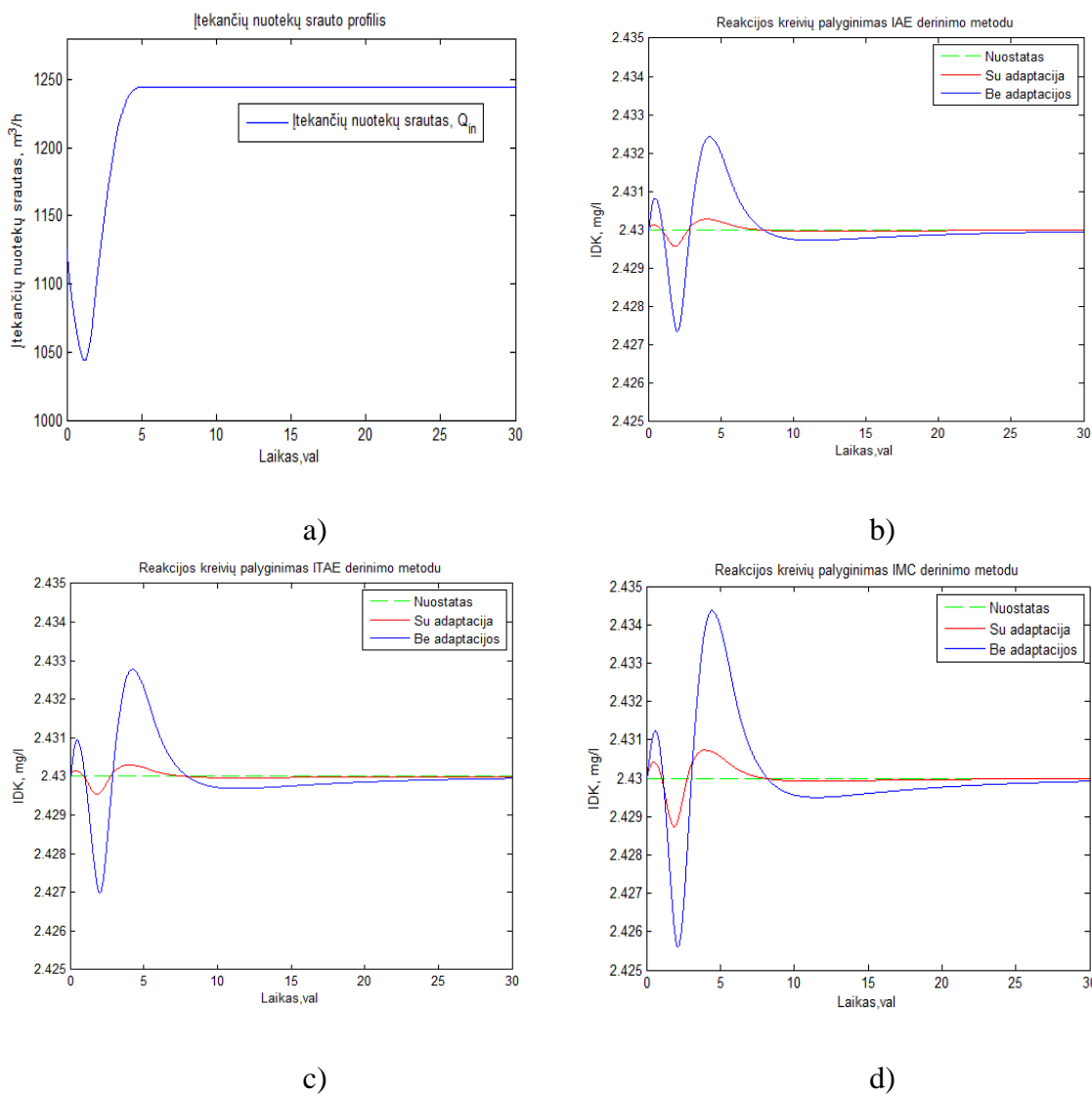
Iš gautų modeliavimo rezultatų matyti, kad įtekančių nuotekų srauto diapazone, kuriame sudaryti adaptacijos algoritmai pagal ITAE ir IAE derinimo metodus, nuostato sekimui, stiprinimo koeficientas pakinta 4,74 – 5 kartus, o laiko pastovioji pakinta 3,35 – 3,45 karto. Adaptacijos algoritmams, sudarytiems pagal ITAE ir IAE derinimo metodus, trikdžio kompensavimui, stiprinimo koeficientas įtekančių nuotekų srauto diapazone pakinta 4,3 karto, o laiko pastovioji – 1,45 karto. Adaptacijos algoritmui, sudarytam pagal vidinio modelio derinimo taisyklės, stiprinimo koeficientas įtekančių nuotekų srauto diapazone pakinta 8,37 karto, o laiko pastovioji – 3,28 karto. Reguliatorių, sudarytų pagal IAE ir ITAE derinimo metodus trikdžio kompensavimui, stiprinimo koeficientai yra vidutiniškai 1,5 karto didesni, o laiko pastoviosios – 2 kartus mažesnės nei IAE ir ITAE derinimo metodų, sudarytų nuostato sekimui.

3.5 Adaptyvios valdymo sistemos reakcijos į kintantį trikdantį poveikį tyrimas

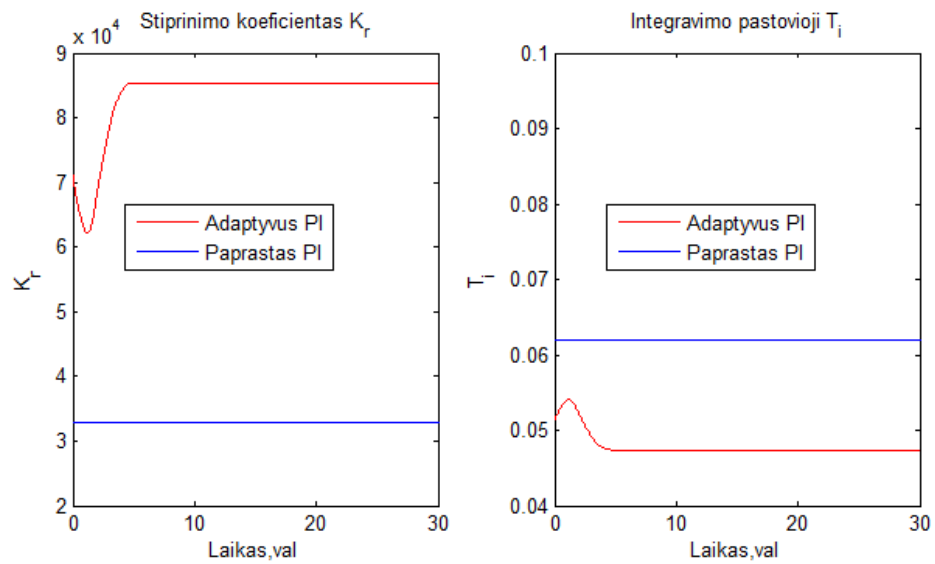
Norint iširti adaptyvios valdymo sistemos naudą prieš PI reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais, atliekami eksperimentai lokaliame darbo taške, keičiant įtekančių nuotekų srautą užduotu profiliu, 3.10 pav. Valdymo sistema eksperimento metu turi palaikyti 2,43 mg/l ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatą. Šio tyrimo metu lyginamos reakcijos kreivės, naudojant ITAE, IAE kriterijus (trikdančiam poveikiui) ir IMC derinimo taisyklės.

Kaip matome iš 3.10 – 3.14 pav. gautų modeliavimo rezultatų, šio eksperimento metu visais trimis derinimo metodais procesas nėra išvedamas iš stabilumo ribų ($\pm 0,01$ mg/l). Naudojant ITAE ir IAE derinimo kriterijus, maksimalus perreguliavimas yra sumažinamas 83,3–85 proc. Naudojant vidinio modelio derinimo taisyklės, maksimalus perreguliavimas sumažinamas 73 proc. Kaip matyti iš 3.11–3.12 pav., didesnis stiprinimo koeficientas gaunamas naudojant IAE nei ITAE derinimo metodą su adaptacija. Tačiau IAE derinimo metodo laiko pastovioji yra mažesnė lyginant

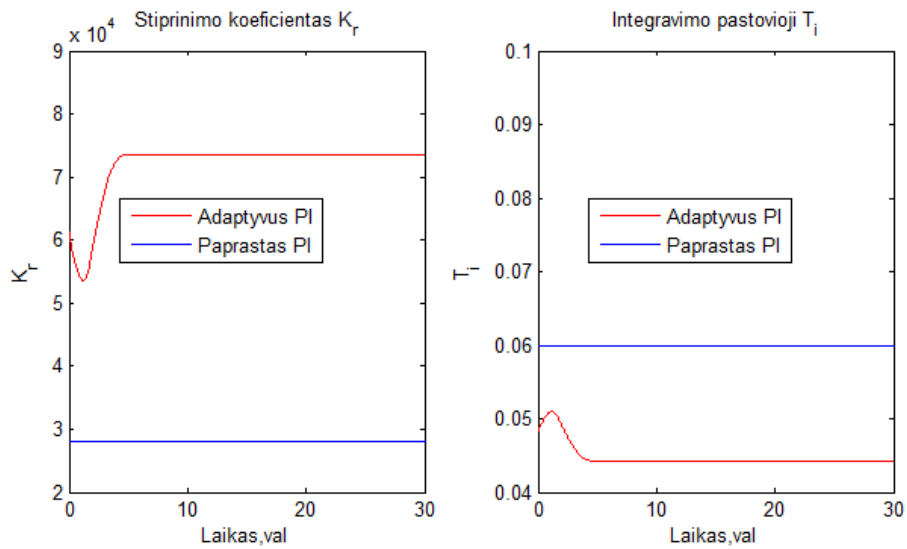
su ITAE derinimo metodu. Naudojant IMC derinimo metodą su adaptacija, gaunamas stiprinimo koeficientas yra mažiausias, o laiko pastovioji – didžiausia. Todėl maksimalus dinaminis nuokrypis, taikant šį metodą, yra didžiausias (3.14 pav.).



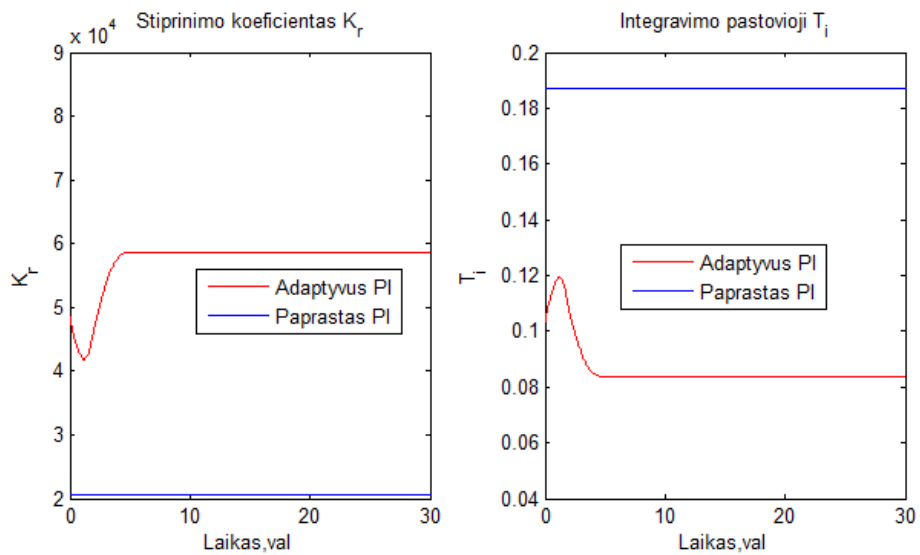
3.10 pav. Reakcijos kreivių palyginimas taikant PI reguliatorių su adaptacija ir PI reguliatorių, suderintą nominaliame taške ($Q_{in}=768 \text{ m}^3/\text{h}$), kuomet sistemą veikia kintantis įtekančių nuotekų trikdys: a – įtekančių nuotekų srauto trikdys; b – sistemos reakcija, naudojant IAE derinimo parametrus; c – sistemos reakcija, naudojant ITAE derinimo parametrus; d – sistemos reakcija, naudojant IMC derinimo parametrus; reakcijos kreivės „be adaptacijos“ gautos naudojant nominalaus taško reguliatoriaus derinimo parametrus.



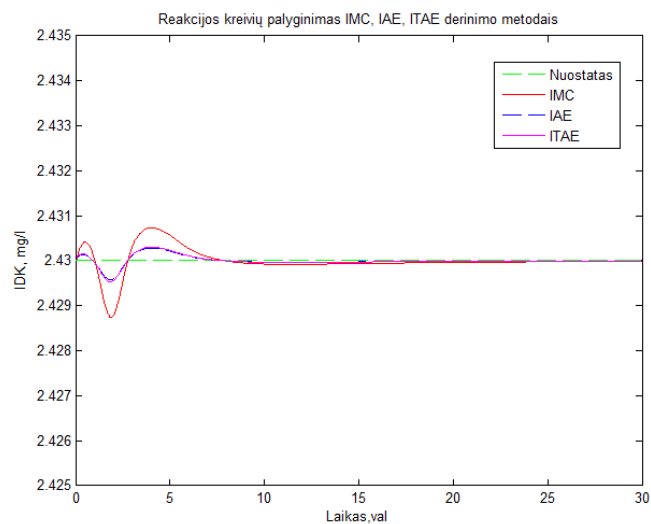
3.11 pav. PI regulatoriaus parametru adaptacijos palyginimas taikant IAE derinimo taisykles.



3.12 pav. PI regulatoriaus parametru adaptacijos palyginimas taikant ITAE derinimo taisykles



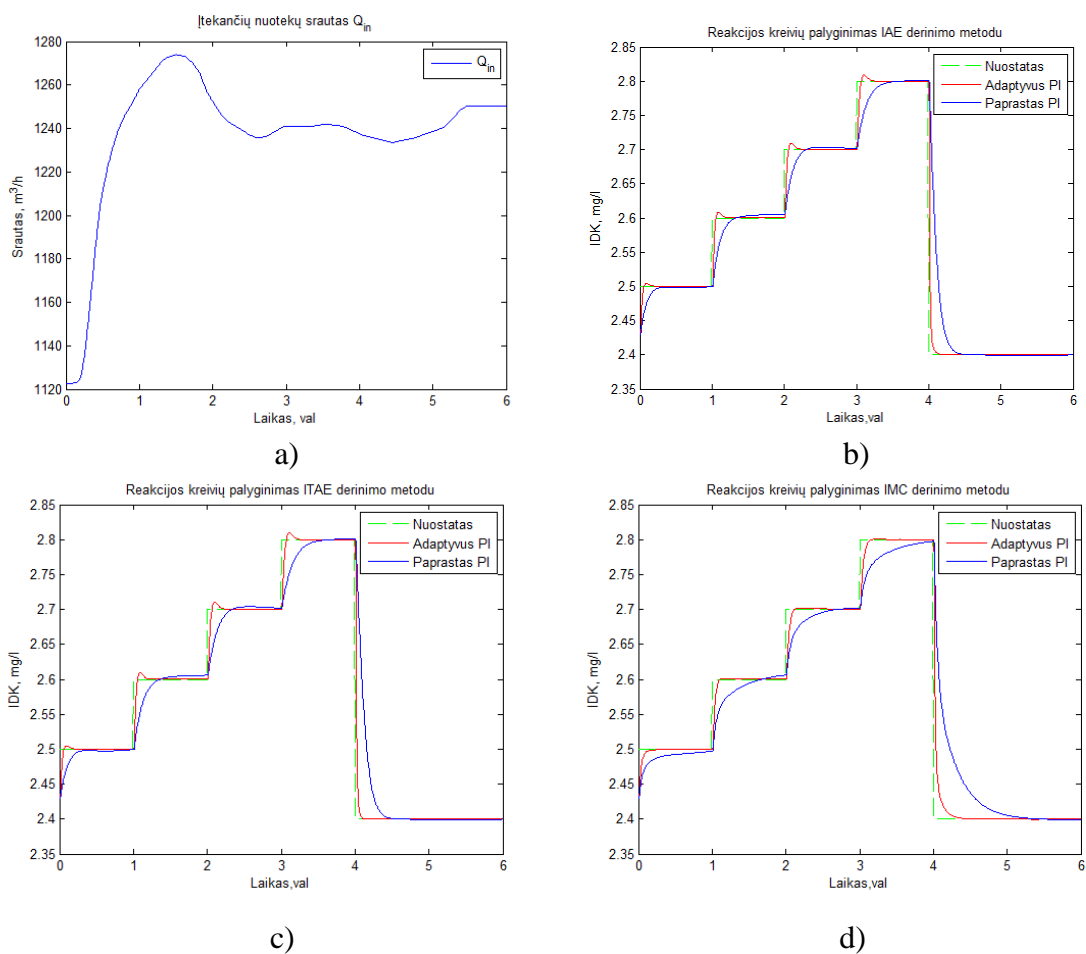
3.13 pav. PI regulatoriaus parametrų adaptacijos palyginimas taikant IMC derinimo taisyklės



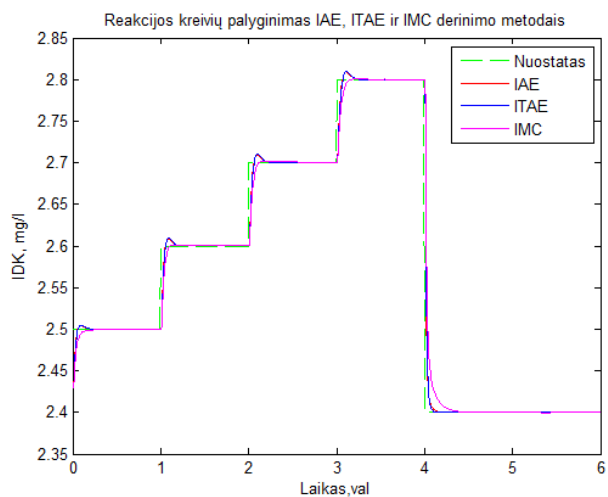
3.14 pav. PI regulatorių su adaptacija palyginimas IMC, IAE, ITAE derinimo metodais lokaliame taške, kai įtekantis nuotekų srautas $Q_{it}=1125 \text{ m}^3/\text{h}$

3.6 Adaptyvaus valdymo sistemos reakcijų į kintantį trikdantį poveikį ir į kintantį nuostatą tyrimas

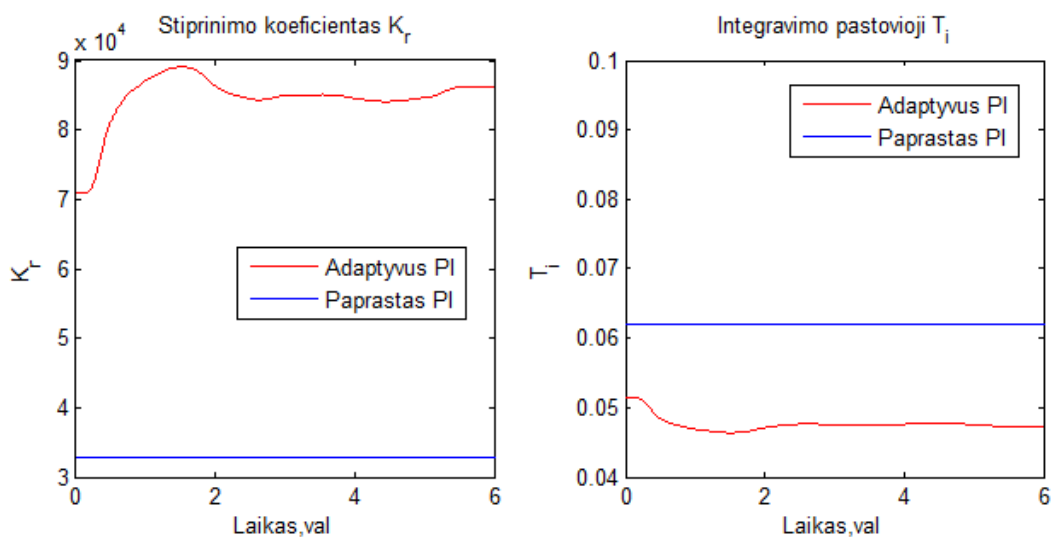
Šio eksperimento metu yra tikrinama, ar sistema su adaptacija geriau seka nuostato pokyčius, kuomet yra kintantis įtekančių nuotekų trikdžis, nei sistema, suderinta lokaliame darbo taške. Įtekančių nuotekų trikdžio profilis pateiktas 3.15 pav. Eksperimento metu naudojami reguliatoriai, suderinti pagal IAE, ITAE (trikdžio kompensavimui) ir IMC derinimo metodus. Gauti modeliavimo rezultatai pateikiami 3.15–3.18 pav.



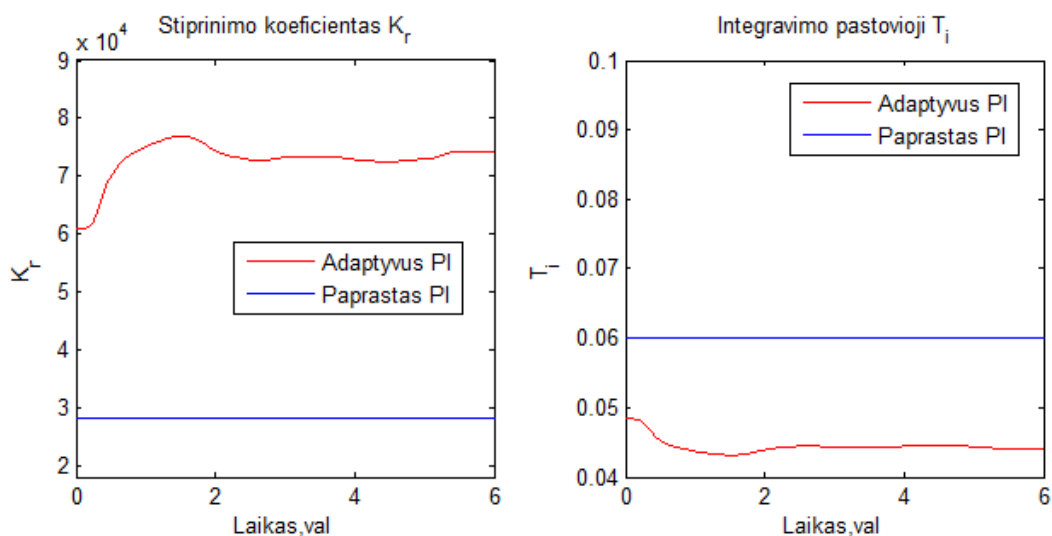
3.15 pav. Reakcijos kreivių palyginimas taikant PI reguliatorių su adaptacija ir PI reguliatorių, suderintą nominaliame taške ($Q_{it}=768$ m³/h), kuomet sistemoje yra keičiamas nuostatas ir veikia kintantis įtekančių nuotekų trikdžis: a – įtekančių nuotekų srauto trikdžis; b – sistemos reakcija, naudojant IAE derinimo parametrus; c – sistemos reakcija, naudojant ITAE derinimo parametrus; d – sistemos reakcija, naudojant IMC derinimo parametrus; paprastam PI reguliatoriui naudojami nominalaus taško reguliatoriaus derinimo parametrai.



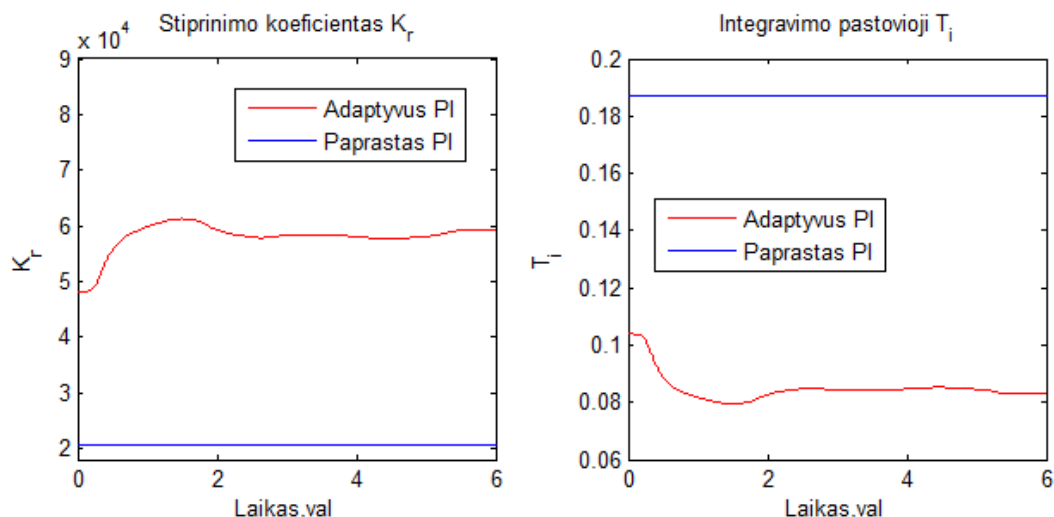
3.16 pav. PI reguliatorių su adaptacija palyginimas IMC, IAE ir ITAE derinimo metodais, lokaliame taške, kai įtekantis nuotekų srautas $Q_{it}=1125 \text{ m}^3/\text{h}$



3.17 pav. PI reguliatoriaus parametrų adaptacijos palyginimas, taikant IAE derinimo taisyklę



3.18 pav. PI reguliatoriaus parametrų adaptacijos palyginimas, taikant ITAE derinimo taisyklę



3.19 pav. PI regulatoriaus parametru adaptacijos palyginimas, taikant IMC derinimo taisykles

Iš gautų rezultatų matyti, kad sistemai veikiant lokaliame taške ir esant kintančiam įtekančių nuotekų trikdžiui bei kintančiam nuostatui, sistema su adaptyviu PI regulatoriumi greičiau pasiekia užduotą nuostatą, nei naudojant paprastą PI reguliatorių. Reguliavimo trukmė, naudojant reguliatorius su adaptacija, sutrumpėjo: IAE ir ITAE metodais – 0,25 valandos, o IMC derinimo metodu nuo 0,4 iki 1 valandos. Kadangi biologinių nuotekų valymo įrenginiuose valdymo sistemos tikslas yra tiksliai sekti nuostatą jo neviršijant, todėl šio eksperimento metu geresni rezultatai gaunami naudojant IMC derinimo parametrus. Naudojant IAE ir ITAE derinimo kriterijus gaunami 10–12 proc. perreguliavimai.

IŠVADOS IR REZULTATAI

1. Išnagrinėti informaciniai šaltiniai aktyvaus dumblo proceso modeliavimo tematika. Žinomas proceso imitacinis modelis patobulintas, įvedant signalams būdingus apribojimus ir vėlavimus bei pridėdant teršalų skaičiavimo modelį.

2. Tiriant sistemos reakciją į kintantį nuostatą, esant pastoviems proceso parametrams, gaunama, kad lokaliame taške suderinti reguliatoriai, pagal IAE, ITAE (nuostato sekimui) ir IMC derinimo metodus, duoda geresnius rezultatus nei naudojant nominalaus taško reguliatoriaus parametrus. Reguliavimo trukmė sumažėjo vidutiniškai 6,7–7 kartus.

3. Tiriant sistemos reakciją į šuolinį įtekančių nuotekų srauto trikdį gaunama, kad valdymo sistema, suderinta lokaliame taške pagal IAE, ITAE (trikdžio kompensavimui) ir IMC derinimo metodus, geriau kompensuoja trikdančius poveikius, nei naudojant reguliatorius, suderintus tais pačiais derinimo metodais lokalaus taško aplinkoje. Maksimalūs dinaminiai nuokrypiai sumažėjo 69–72 proc.

4. Sudarytas reguliatoriaus adaptacijos algoritmas, paremtas derinimo parametru priklausomybių nuo įtekančių nuotekų srauto aproksimavimu antros eilės polinominiu modeliu. Įtekančių nuotekų srauto diapazone, kuriame sudaryti adaptacijos algoritmai, reguliatoriaus stiprinimas (K_r) ir laiko pastovioji (T_i), pakinta:

- IAE nuostato sekimui: K_r – 5 kartus; T_i – 3,35 kartus.
- IAE trikdžio kompensavimui: K_r – 4,3 kartus; T_i – 1,45 kartus.
- ITAE nuostato sekimui: K_r – 4,7 kartus; T_i – 3,45 kartus.
- ITAE trikdžio kompensavimui: K_r – 4,37 kartus; T_i – 1,45 kartus.
- IMC: K_r – 8,37 kartus; T_i – 3,28 kartus.

Reguliatorių, sudarytų pagal IAE ir ITAE, trikdžio kompensavimui stiprinimo koeficientai vidutiniškai 1,5 kartus didesni, o laiko pastoviosios 2 kartus mažesnės nei tų pačių derinimo metodų, sudarytų nuostato sekimui.

5. Tiriant sistemos reakciją į kintantį įtekančių nuotekų srautą gaunama, kad PI reguliatoriai su adaptacija, kurie suderinti pagal IAE, ITAE, IMC derinimo kriterijus, geriau kompensuoja trikdančius poveikius nei nominalaus taško aplinkoje suderinti PI reguliatoriai. Maksimalūs dinaminiai nuokrypiai, pritaikius adaptacijos algoritmus, sumažėjo 73–85 proc.

6. Tiriant sistemos reakciją į kintantį įtekančių nuotekų srautą ir į keičiamą nuostatą gaunama, kad PI reguliatoriai su adaptacija, kurie suderinti pagal IAE, ITAE, IMC derinimo kriterijus, geriau seka nuostatą nei nominalaus taško aplinkoje suderinti PI reguliatoriai. Reguliatorių su adaptacija, suderintų pagal IAE ir ITAE kriterijus, perreguliavimas yra 12–14 proc., o taikant IMC derinimo taisyklės perreguliavimas – 0 proc.

7. Naudojant adaptyvų valdymą, kuomet sistemoje veikia kintantis trikdys ir ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatas yra pastovus, rekomenduojama taikyti IAE arba ITAE reguliatorių derinimo kriterijus. Šiais derinimo kriterijais gauti perreguliavimai perpus mažesni nei taikant vidinio modelio derinimo taisykles. Jei valdymo sistemoje kinta ir IDK nuostatas, ir įtekančių nuotekų srautas, rekomenduojama taikyti vidinio modelio derinimo taisykles, nes reguliavimo trukmė nesiskiria nuo IAE ir ITAE derinimo kriterijų, o perreguliavimas yra 0 proc.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Valymo įrenginių su aktyviuoju dumbļu valymo principai ir privalumai. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-20]. Prieiga per internetą: <http://www.august.lt/lt/eksperto-nuomone/valymo-irenginiu-su-aktyvuuju-dumblu-valymo-principas-ir-privalumai-i-ii>
2. Vabolienė G. Fosforo ir azoto biologinio šalinimo iš nuotekų tyrimai ir vertinimas. Vilnius, 2008.
3. Skaisgirienė A. Biologinio nuotekų valymo tyrimai naudojant fermentinius preparatus., Vilnius, 2006.
4. Repšytė J., Simutis R. Process simulator for wastewater treatment plant. Informacinės technologijos ir valdymas, 2004, Nr. 3(32)
5. Lindberg, C-F. 1997. Control and Estimation Strategies Applied to the Activated Sludge Process, 214pp. Uppsala.
6. Aeration in wastewater treatment [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-20]. Prieiga per internetą: <http://www.seas.ucla.edu/stenstro/Aeration.pdf>
7. Jonelis K. Nutekamųjų vandens valymo biotechnologinių procesų valdymo algoritmai ir sistemos. Kaunas, 2012
8. Norhaliza Abdul Wahab, Reza Katebi and Jonas Balderud (2011). Multivariable PID control of an Activated Sludge Wastewater Treatment Process, PID Control, Implementation and Tuning, Dr. Tamer Mansour (Ed.)
9. Ūsas M. Veikliojo dumblo apkrovų analizė bioplėveliniame buitinių nuotekų valymo įrenginyje. Akademija, 2009.
10. Mulas M. Modelling and control of activated sludge processes 2006.
11. Jeppsson U. Modelling aspects of wastewater treatment processes. Lund Institute of Technology, Sweden, 1996.
12. Levišauskas. D. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas. Mokomoji knyga. Vilnius: 2008.
13. Henze M. ir kt. Activated sludge models Asm1, Asm2, Asm2d and Asm3. London, UK 2000.
14. Tao G. Multivariable adaptive control: A survey. Automatica 50 (2014) 2737–2764p.
15. Gernaey V. K. ir kt. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. Environmental Modelling & Software 19 (2004) 763-783p.
16. Nelson M. I., Sidhu H. S., Analysis of the activated sludge model (number 1). Applied Mathematics Letters 22 (2009) 629-635p.

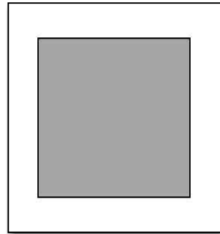
17. IWA Task Group on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-20]. Prieiga per internetą: <http://www.benchmarkwwtp.org>
18. Landau I.D ir kt. Adaptive control algorithms, analysis and applications. 2011, 590p
19. Galvanauskas V., Levišauskas D., Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas. Mokomoji knyga. Vilnius, 2008.
20. Galvanauskas V., Levišauskas D., Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas. Praktikumai ir uždaviniai. Mokomoji knyga. Vilnius, 2008.
21. Astrom K. J., Wittenmark B., Adaptive control (2nd edition) 1994.
22. Jonelis K., Repšytė J., Levišauskas D., Ištirpusio deguonies koncentracijos nutekamųjų vandenų valymo aeruojamose kamerose adaptyvi valdymo sistema. Elektros ir valdymo technologijos. Kaunas, 2007.

PRIEDAI

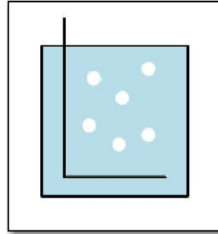
1. Priedas



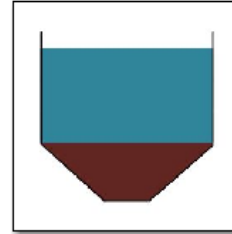
Įtekejimas



Neaeruojami rezervuarai



Aeruojami rezervuarai



Antrinis sedintuvas



Teršalu koncentracija
nutekamuosiuose
vandenyse



Istirpusio deguonies konc. ARS

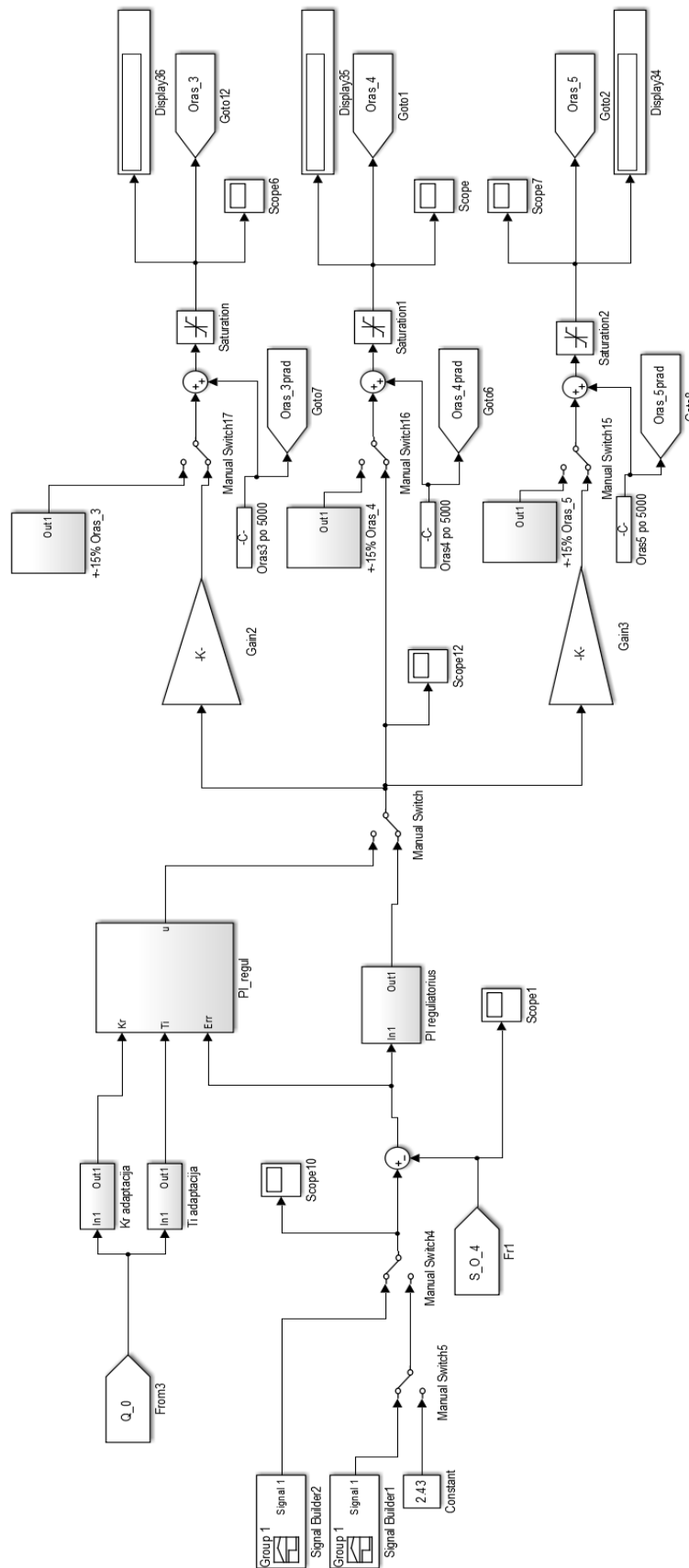
ASM1 modelio schema Matlab/Simulink aplinkoje

Įtekančių nuotekų koncentracijos

Medžiaga	Vertė	Matavimo vnt.
Q_0	768	m ³ /h
S_{S_0}	69.50	mg/l
$X_{B_H_0}$	28.17	mg/l
X_{S_0}	202.32	mg/l
X_{I_0}	51.20	mg/l
S_{NH_0}	31.56	mg/l
S_{I_0}	30	mg/l
S_{ND_0}	6.95	mg/l
X_{ND_0}	10.59	mg/l

Įtekantis oro srautas m ³ /h	416,7	583,3	666,7	768,6	833,3	875,0	1000,0	1125,0
IAE NUOSTATAS	Kr	8132,499	11843,801	14588,517	19301,523	23987,797	27672,287	41170,887
	Ti	0,311	0,235	0,208	0,180	0,169	0,160	0,093
IAE TRIKDIS	Kr	14874,037	20899,266	25347,883	32911,426	40548,204	46442,711	64283,628
	Ti	0,073	0,068	0,065	0,062	0,061	0,060	0,051
ITAE NUOSTATAS	Kr	7250,803	10403,468	12732,307	16714,237	20697,382	23805,476	34369,664
	Ti	0,305	0,229	0,203	0,175	0,164	0,155	0,088
ITAE TRIKDIS	Kr	12667,988	17845,573	21668,270	28172,012	34730,777	39800,110	55376,459
	Ti	0,071	0,065	0,063	0,060	0,058	0,057	0,048
ISE	Kr	18318,353	25938,844	31565,343	41151,095	50795,060	58269,181	81921,141
	Ti	0,083	0,077	0,075	0,072	0,071	0,069	0,060
Cohen&Coon	Kr	34185,777	39399,205	42150,557	45996,898	47977,498	49715,692	74137,053
	Ti	0,059	0,056	0,055	0,054	0,053	0,053	0,045
IMC	Kr	5221,714	9839,066	13547,078	20581,856	26477,566	30404,194	43710,191
	Ti	0,321	0,243	0,216	0,187	0,175	0,166	0,098

Reguliatorių parametrai lokaliuose ir nominaliame taškuose



Ištirpusio deguonies koncentracijos ir adaptyvaus valdymo schema Matlab/Simulink aplinkoje

4. Priedas

Nominalaus taško nusistovėjusios proceso reikšmės aerotankuose

Medžiaga	Aerotankai					Matavimo vnt.
	1	2	3	4	5	
$X_{B,H}$	2552.960403	2555.169985	2558.485324	2560.159792	2560.069405	mg/l
$X_{B,A}$	148.473788	148.393459	149.025993	149.612192	149.882035	mg/l
S_S	2.684736	1.389059	1.107219	0.962003	0.861773	mg/l
X_S	79.888481	73.201750	62.283041	53.673004	47.652497	mg/l
X_P	449.091936	449.763277	450.659361	451.556059	452.452742	mg/l
X_{ND}	5.137410	4.819854	4.223102	3.745534	3.417207	mg/l
S_{ND}	1.228163	0.912612	0.825473	0.752933	0.675129	mg/l
S_{NH}	7.892170	8.314163	5.544177	2.966642	1.728968	mg/l
S_{NO}	18.781803	17.969295	20.960802	23.793957	25.163504	mg/l
S_{Alk}	5.937333	6.096804	5.693405	5.312173	5.144017	mol/m ³
S_O	0.004397	0.000066	1.720000	2.430000	0.491000	mg/l

Nominalaus taško nusistovėjusios reikšmės sėsdintuve

Medžiaga	Nusėsdintuvas	Matavimo vnt.
S_{ND}	0.675129	mg/l
S_S	0.861773	mg/l
S_{NH}	1.728968	mg/l
S_{NO}	25.163503	mg/l
S_O	0.491000	mg/l
$X_{B,H}$	5006.081185	mg/l
$X_{B,A}$	293.086440	mg/l
X_S	93.181954	mg/l
X_P	884.747557	mg/l
X_{ND}	6.682169	mg/l
S_{Alk}	6.096804	mol/m ³