

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Mykolas Endriukaitis
**UŽDUOTOJO BIOMASĖS PROFILIO SEKIMO SISTEMŲ
TYRIMAS**

Baigiamasis
magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Vytautas Galvanauskas

KAUNAS, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA**

**UŽDUOTOJO BIOMASĖS PROFILIO SEKIMO SISTEMŲ
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Galvanauskas
(data)

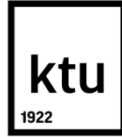
Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mykolas Endriukaitis
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Mykolas Endriukaitis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Užduotojo biomasės profilio sekimo sistemų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. Gegužės 26 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Mykolo Endriukaičio** baigiamasis projektas tema „**Užduotojo biomasės profilio sekimo sistemų tyrimas**“ 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)

Endriukaitis, M. Užduotojo Biomasės Profilio Sekimo Sistemų Tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. Dr. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016.52 psl.

SANTRAUKA

Biotechnologijos gamyklos susiduria su trikdžiais, tokiais kaip: žaliavos kitimai, aplinkos pokyčiai, įrangos gedimai, žmogaus klaidos. Jei šie trikdžiai nėra laiku identifikuojami, jie gali sukelti avarijas, produkto pablogėjimą ar net netekimą.

Darbe aptariami biotechnologiniai procesai, parametrų tipai bei įvairių kintamųjų matavimo metodai, įvairios balanso lygtys, matematiniai metodai. Tyrimo tikslas yra sukurti biotechnologinio proceso matematinį modelį, biomasės profilio sekimo sistemas bei jas palyginti. Darbo eigoje yra pateikiami visi modelio kūrimo, parametrų ir proceso optimizavimo rezultatai.

Tyrimui pasirinktas biotechnologinis procesas, kuris naudoja periodinio veikimo su pamaitinimu bioreaktorių. Pasitelkus literatūroje pateiktais duomenimis, sukurtos dvi biomasės profilio sekimo sistemos.

Atliktas sukurtų biomasės profilio sekimo sistemų testavimas bei palyginta sekimo kokybė.

Reikšminiai žodžiai: biotechnologinis procesas, bioreaktorius, biomasė, deguonis, matematinis modeliavimas, sekimo sistema, trikdžiai

Endriukaitis, M. Investigation of Biomass Reference Profile Tracking Systems. Final project of master / supervisor Prof. Dr. Vytautas Galvanauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation. Kaunas, 2015. 52 pages.

SUMMARY

Factories of biomass fermentation confront with disturbances such as raw material variations, environmental changes, equipment failures and human errors. If these disturbances are not identified on time, they can cause failure and accidents, deterioration or loss of the product.

Biotechnological processes types of parameters and measuring methods of different variables and various balance equations also mathematical models are reviewed in this work. The main objective of the work is to create precise mathematical model, profile tracking systems and compare both of them. During research all modeling processes parameters and processes optimization results are shown.

Bioprocess using a batch bioreactor was chosen for the research. Two biomass tracking systems were created using various references.

To sum up, biomass profile tracking system was tested and their tracking quality was compared.

Keywords: biotechnological process, bioreactor, biomass, oxygen, mathematical modeling, tracking system, disturbance

Turinys

Turinys.....	6
Įvadas.....	8
1 Apžvalginė dalis.....	9
1.1 Bendrieji biotechnologiniai procesai. Fermentacija	9
1.2 Veiksniai, darantys įtaką biomasės augimui.....	11
1.3 Biotechnologinių procesų klasifikacija.....	12
1.4 Matematinis modelis.....	15
1.5 Valdymo sistemos.....	15
1.5.1 Tiesioginio ir grįžtamojo ryšio valdymo sistemos	15
1.5.2 Trikdžių kompensavimo valdymo sistemos	16
1.5.3 Adaptyvusis valdymas	17
1.5.4 Adaptyvaus valdymo regulatoriaus derinimo metodai.....	19
2 Metodologinė dalis.....	20
2.1 Matematinis modelis.....	20
2.2 Biotechnologinio proceso modeliavimo duomenys.....	24
2.3 Biomasės profilio sekimo sistemos.....	26
2.3.1 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje.....	26
2.3.2 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje.....	27
3 Tyrimo rezultatų palyginimas, rezultatų dalis.....	30
3.1 Tyrimo rezultatų palyginimas, kai trikdis – pamaitinimo substrato staigus sumažėjimas	30
3.1.1 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių	31
3.1.2 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 50 %.....	33
3.1.3 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 75 %.....	35
3.1.4 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substratas sumažėja 50 %.....	37
3.1.5 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substratas sumažėja 75 %.....	39
3.1.6 Rezultatų dalis, trikdis – pamaitinimo substrato staigus sumažėjimas.....	42
3.2 Tyrimo rezultatų palyginimas, kai trikdis – aptriukšmintas, <i>OUR</i> - deguonies sunaudojimo greičio, matavimas	43
3.2.1 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, <i>OUR</i> signalas aptriukšmintas ~ 2 %	43
3.2.2 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, <i>OUR</i> signalas aptriukšmintas ~ 10 %	44

3.2.3	Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 50 %, <i>OUR</i> signalas aptriukšmintas ~ 2 %	45
3.2.4	Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 50 %, <i>OUR</i> signalas aptriukšmintas ~ 10 %	45
3.2.5	Rezultatų dalis, kai trikdys – aptriukšmintas, <i>OUR</i> - deguonies sunaudojimo greičio, matavimas	46
4	Išvados ir rezultatai	47
5	Litertūros šaltiniai	48
6	Priedai.....	49
6.1	Priedas Nr. 1 Matematinio modelio „Matlab“ programos tekstas	49
6.2	Priedas Nr. 2 Estimatorius modelio „Matlab/simulink“ programos tekstas	50
6.3	Priedas Nr. 3 pakopinės biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje „Matlab/simulink“ schema	51
6.4	Priedas Nr. 4 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje „Matlab/simulink“ schema	52

Ivadas

Biotechnologijos mokslą galima apibrėžti kaip gamtos ir technikos mokslų susijungimą, kadangi jo pagrindinis tikslas – panaudoti įvairius mikrobiologinius objektus, ląsteles, jų dalis bei molekulinis analogus paslaugų tiekimui ir naujų produktų gamybai.

Biotechnologinius procesus galima apibūdinti kaip vienus iš sudėtingiausių technologinių procesų. Šiuose procesuose vyrauja itin daug biocheminių reakcijų, įtakojančių gamybos sąnaudas, galutinio produkto kokybę bei kiekį. Vykstant fermentacijos gamybai, susiduriama su įvairiausiais trikdžiais: aplinkos pasikeitimais, žaliavos kitimais, įrangos gedimais ar netgi žmogaus klaidomis. Laiku nepastebėti minėtieji trikdžiai gali sukelti avarijas, dėl jų gali sumažėti produkto kokybė, arba gali būti prarastas visas produktas. Dėl šių priežasčių būtina garantuoti, jog bioreaktoriuose būtų reikiamos kokybės pakankamas mikroorganizmų kiekis, kuris tinkamai juose augtų. Įvertinus ekonominį šių procesų svarbumą, būtina užtikrinti optimalų jų darbą. Taip pat reikia siekti kuo didesnių kokybės bei ekonominių rodiklių.

Aktualus uždavinys dabartinėse valdymo sistemose – palaikyti pastovią užduotojo profilio reikšmę. Tipiniams biotechnologiniams procesams spręsti naudojami skaitmeniniai integravimo algoritmai. Pagrindinę biotechnologinių procesų modelių dalį sudaro medžiagų balanso lygtys, aprašomos netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis. Šiomis lygtimis modeliuojamos biotechnologinių procesų metu kintančios biomasės, maitinančių substratų, šaltinių, tarpinių ir tikslo produktų koncentracijos bei kultivavimo terpės tūris arba svoris.

Darbo tikslas:

Ištirti biomasės profilių sekimą panaudojant skirtingas reguliavimo sistemas, palyginti jų darbą veikiant įvairiems trikdžiams.

Darbo uždaviniai:

Realizuoti literatūroje [1] pateiktą biotechnologinio proceso matematinį modelį Matlab/Simulink aplinkoje. Taip pat, realizuoti literatūroje [2][3] pateiktas reguliavimo sistemas Matlab/Simulink programoje. Naudojant biotechnologinį proceso modelį tirti sistemų gebėjimą sekti užduotus profilius, veikiant įvairiems trikdžiams. Rezultatus susisteminti, palyginti sistemas, pateikti išvadas.

1 Apžvalginė dalis

1.1 Bendrieji biotechnologiniai procesai. Fermentacija

Fermentacija – procesas, kurio metu tiek anaerobiškai, tiek aerobiškai auginamas didelis ląstelių kiekis (biomasė) naudojant specialią įrangą – bioreaktorių. Fermentais vadinami įvairių taksonominių ir netgi mažai tarpusavyje giminingų gyvojo pasaulio grupių atstovai, kurie dar kitaip vadinami mikroorganizmais. Pastarąjį pavadinimą mikrobiologiniai objektai yra įgavę dėl itin mažo savo dydžio. Šiuos organizmus, jų sandarą, turinį įmanoma tirti tik naudojant mikroskopo pagalbą. Biotechnologiniuose procesuose svarbūs ir naudojami įvairūs mikroorganizmai, kuriuos galima klasifikuoti taip:

- bakterijos;
- mikroskopiniai grybai (mikromicetai);
- mikroskopiniai dumbliai;
- pirmuonys;
- virusai.

Fermentacijos proceso veikimą galima išskirti į tris stadijas. Vykstant visoms trimis fermentacijos stadijoms pagrindinis biotechnologų tikslas – palaikyti optimalias aplinkos sąlygas, kurios yra reikalingos galutinio produkto susidarymui. Biocheminiame reaktoriuje vykstančio biotechnologinio proceso modelio dalis galima apibrėžti kaip[9]:

- periodinė: uždara sistema, fiksuotas bioreaktoriaus tūris, fiksuota proceso trukmė, pradinė komponentų koncentracija kinta;
- periodinė su pamaitinimu: papildoma šviežia terpe, tūris auga, fiksuota proceso trukmė;
- nepertraukiama: papildoma šviežia terpe, tūris nekinta, perteklius pašalinamas/surenkamas.

Biomassės augimas vyksta pagal tokią schemą: inertinė fazė, augimo fazė, stacionari fazė ir ląstelių žūtis fazė. Uždarame inde biomassės augimą limituoja arba mitybinės terpės sueikvojimas arba toksinių metabolizmo produktų susikaupimas. Visos šios fazės labai svarbios biotechnologijai. Norint pasiekti geras produkto išeigas būtina kiek įmanoma sutrumpinti inertinę fazę ir padidinti mikroorganizmų augimo greitį augimo fazėje bei prailginti šios fazės trukmę. Tai daroma tam, kad būtų gaunamas kuo didesnis mikroorganizmų tankis proceso

pabaigoje. Pakeitus terpės tipą mikroorganizmams reikalingas tam tikras laiko tarpas prisitaikymui, todėl gaunama dar viena inertinė fazė.[9]

Didelė dalis svarbesnių produktų, tokių kaip antibiotikai, susidaro stacionarinėje, pertraukiamojo auginimo, kultivuojamų ląstelių augimo fazėje. Tam, kad pratęstų pertraukiamąją fermentaciją, kartu padidinant išėigą, naudojamas taip vadinamas ląstelių pamaitinimas. Skirtingai nei pertraukiamojo auginimo bioreaktoriuje, procesas su nepertraukiama fermentacija yra geriau subalansuotas – auginama su nedideliais maistingų medžiagų, ląstelių skaičiaus ar biomasės kiekio svyravimais.[9]

1.2 Veiksniai, darantys įtaką biomasės augimui

Biotechnologijos mokslo šakoje dalis kintamųjų yra tiesiogiai neišmatuojami. Tokius kintamuosius reikia įvertinti pagal kintamuosius, kuriuos galime išmatuoti. Tačiau tam reikia turėti įvertinamo proceso matematinį modelį.

Biotechnologinių parametrų galimi matavimo metodai: tiesioginiai ir netiesioginiai. Taikant tiesioginio matavimo metodą jutikliai gali būti instaliuojami dviem būdais: jutikliai surenkami už bioreaktoriaus ribų arba pačiame bioreaktoriuje. Tiesioginio signalo jutikliai dar klasifikuojami: realaus laiko; signalai su dideliu vėlavimu kai signalas gaunamas ne dabartiniu laiku.

Netiesioginio matavimo parametrais vadinami tie parametrai, kurių tiesiogiai išmatuoti neįmanoma. Šie kintamieji turi būti vertinami pagal išmatuojamuosius kintamuosius. Naudojant netiesioginio matavimo metodą reikiama proceso reikšmė išskaičiuojama matuojant vieną ar kelis dydžius ir naudojant proceso matematinį modelį su nustatytomis funkcinėmis priklausomybėmis.[9]

Matuojami kintamieji:

- terpės temperatūra;

Terpės temperatūra turi įtakos reakcijos greičiui. Temperatūros pokyčiai turi labai didelę įtaką cheminėms reakcijoms. Temperatūros įtaka reakcijos greičiams yra apibrėžiama: temperatūrai pagreitinus denatūraciją kartu gali būti paveiktas ir fermento stabilumas, fermento sąveika su substratu, fermento sąveiką su inhibitoriais. Fermentinėse reakcijose kylant temperatūrai vienu atveju reakcijos greitis didėja, kitu atveju – vyksta fermentų denatūracijos procesas.[7]

- terpės vandens sudedamosios dalys;

Vandens terpė stipriai įtakoja mikroorganizmų augimą bei dauginimąsi. Vandenį kartas nuo karto reikėtų iširti, norint išvengti terpės išsausėjimo.

- terpės aktyvumas;

Nepakankamo terpės aktyvumo nustatymas yra labai svarbus statiškuose ar periodiškuose bioreaktoriuose. Biomasės augimas sumažina terpės aktyvumą, sumažindamas CO₂ ir O₂ perdavimą tarp dujinės ir vientisosios terpės, taip sumažindamas medžiagų apykaitos šilumos atidavimą.

- CO₂ ir O₂ koncentracija;

Pagal išmetamųjų dujų išsiskyrimą galima spręsti apie bioreaktoriaus veiklos kokybę. Žinant CO₂ ir O₂ koncentracijas galima apskaičiuoti tikslų biomasės greitį ir įvertinti bioreaktoriaus veikimą.

- pH;

Optimalios biomasės auginimas reikalauja tam tikro pH kiekvienam mikroorganizmui. pH stipriai įtakoja reakcijos greičius. Nukrypus fermento pH nuo optimalaus taško į vieną ar į kitą pusę, fermento aktyvumas žymiai sumažėja. Parametras pH yra vienas iš svarbesnių fermentų aktyvumo reguliavimo ląstelėje veiksnių.[8]

- biomasės koncentracija;

Norint nustatyti biomasės būklę, biomasės koncentracija yra vienas iš pagrindinių dydžių. Norint nustatyti biomasės augimo dydį, reikia nepamiršti dujų kontroliavimo. Taip pat nereikia pamiršti, jog ne vientisumo būklė vientisoje terpėje, turės įtakos netolygiam mikroorganizmų augimui terpėje.[8]

- substrato koncentracija;

Tam, kad bioreaktorius veiktų įprastose sąlygose, įprastai užtenka nustatyti pradinę substrato koncentraciją. Tačiau norint, jog bioreaktorius veiktų optimaliomis sąlygomis, neretai reikia nustatyti riboto substrato koncentraciją.

- produkto koncentracija;

Koncentracijos reguliavimas turi didelę vertę norint užtikrinti optimalų veikimą bei produkto kokybę biotechnologiniuose procesuose. Reguluojant produkto koncentraciją, tam tikrais atvejais, gaminamas produktas gali būti sumažintas. Taip pat produkto koncentracijos kontroliavimas yra svarbus nustatant optimalią fermentacijos trukmę.

1.3 Biotechnologinių procesų klasifikacija

Biotechnologinių procesų klasifikacija pagal veikimo principą:[2]

- Periodinis su pamaitinimu procesas;
- Periodinis kartotinis su pamaitinimu procesas;
- Periodinis procesas;
- Nenutrūkstamas procesas.

Vykstant periodiniam su pamaitinimu procesui į reaktorių tiekiami pamaitinimo substratų srautai, o iš reaktoriaus cikliškai ištraukiama mėginams reikalinga terpės dalis. Tokio tipo procese kiekvienai iš modeliujamų medžiagų galioja lygtis:[2]

$$\frac{dC_1}{dt} = q_1 C_2 + \frac{F_{in}}{V} (C_{in1} - C_1) \quad (1)$$

q_1 - santykinis reakcijos greitis [g/gh], C_1 -medžiagos masė [g/l], $q_1 C_2$ - santykinis reakcijos greitis C_2 medžiagos koncentracijos atžvilgiu, t.y. parodo, koks medžiagos C_1 kiekis susidaro medžiagos C_2 masės vienetui per laiko vienetą. [(g C_1)/g C_2 h], C_{in1} - medžiagos C_1 koncentracija [g/l] įtekančiame tirpale, F_{in} - įtekančio tirpalo tūrinis srautas [(l/h)].[2]

Terpės tūriui:

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (2)$$

F_{out} - tūrinis medžiagos srautas, ištekantis iš reaktoriaus [(l/h)]. .

Svarbus aspektas – kai realiame procese yra keletas srautų, kuriuose yra skirtingų modeliuojamų parametrų medžiagų koncentracijos C_{ini} , – reikalinga modeliuoti atskirus įtekančius srautus, o ne tik bendrą įtekančią srautą F_{in} , šiuo atveju lygtis tampa sudėtingesnė. Atsižvelgiant į tai, jog modeliuojama n koncentracijų, o santykiniai reakcijų greičiai pateikiami pirmosios koncentracijos atžvilgiu, gaunama tokia lygčių sistema:

$$\frac{dC_1}{dt} = q_1 C_2 + \frac{F_{in1}}{V} C_{in1} - \frac{F_{in}}{V} C_1 \quad (3)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = q_i C_2 + \frac{F_{in1}}{V} C_{ini} - \frac{F_{in}}{V} C_i \quad (4)$$

$$\frac{dC_n}{dt} = q_n C_1 + \frac{F_{inn}}{V} C_{inn} - \frac{F_{in}}{V} C_n \quad (5)$$

$$F_{in} = \sum_{i=1}^n F_{ini} \quad (6)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (7)$$

Periodinis kartotinis su pamaitinimu procesas nuo periodinio su pamaitinimu proceso masės balanso lygtimis skiriasi nedaug. Minėtų procesų pagrindinis skirtumas – kad terpė iš reaktoriaus yra ištraukiama. Ištraukiamas nemažas terpės kiekis (10 – 25 % terpės tūrio), kuris tolesniame produkto gryninimo etape yra apdorojamas kartu su proceso pabaigoje iš reaktoriaus ištraukta terpe. Ši ištraukta terpė modeliuojama gali būti įvertinama kaip tolydus arba diskretinis srautas F_{wdr} ir yra įtraukiamas į F_{out} greta bandinių paėmimo srauto.[2]

$$F_{out} = F_{smp} - F_{wdr} \quad (8)$$

Periodinio proceso metu biotechnologinis procesas vyksta tol, kol terpėje yra substratų nuo proceso pradžios. Vykstant periodiniam procesui pamaitinimo nėra, tačiau yra kitų skysčių srautų į reaktorių. Dažniausiai šie srautai – rūgščių ir bazės tirpalai, subalansuojantys terpės pH bei priemonės putų nusodinimui. Lyginant periodiniame su pamaitinimu procese esančiais substratų srautais, periodinio proceso metu minėti srautai sudaro itin nedidelę dalį, tačiau visgi į juos atsižvelgti yra būtina. Todėl masės balanso lygčių sistemoje nebelieka tiekiamų pamaitinimo tirpalų substratų:[2][9]

$$\frac{dC_1}{dt} = q_1 C_2 - \frac{F_{in}}{V} C_1 \quad (9)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = q_1 C_2 - \frac{F_{in}}{V} C_i \quad (10)$$

$$\frac{dC_n}{dt} = q_1 C_2 - \frac{F_{in}}{V} C_n \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (12)$$

Jeigu $F_{in} = 0$ arba jis labai mažas palyginti su V , tai narius su minuso ženklu galima atmesti. Tokiu atveju tūris taip pat nemodeliuojamas.

Nenutrūkstamas procesas. Jo metu pamaitinimo srautas į reaktorių yra proporcingas ištraukiamam terpės srautui. Esant pastoviam darbo režimui, tūris nekinta ($dV/dt=0$). Dažniausiai santykiui F_{in}/V ženklinti naudojama raidė D (angl. Dilution - skiedimas), kuri nurodo terpės skiedimo pateikiamo substrato tirpalu intensyvumą. Moduliuojamų kintamųjų sistema, užrašoma taip:

$$\frac{dC_1}{dt} = q_1 C_1 + \frac{F_{in}}{V} (C_{in1} - C_1) \quad (13)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = q_i C_1 + \frac{F_{in}}{V} (C_{iin} - C_i) \quad (14)$$

$$\frac{dC_n}{dt} = q_n C_1 + \frac{F_{in}}{V} (C_{nin} - C_n) \quad (15)$$

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (16)$$

Medžiagų, kurių nėra tiekiamame tirpale, koncentracijos C_{iin} yra lygios 0.

1.4 Matematinis modelis

Matematinio modeliavimo pagrindinė dalis – netiesinėmis lygtimis pateikiamos adekvačios medžiagų balanso lygtys. Naudojant šias masės balanso lygtis – formuojamos biomasės, maitinančių substratų, tarpinių, šalutinių ir tikslo produktų koncentracijos, kintančios analizuojamame biotechnologiniame procese ir kultivavimo terpės svoris arba tūris. Greta to, kultivavimo terpėje dar yra modeliuojamos ištirpusio deguonies ir anglies dioksido koncentracijos.

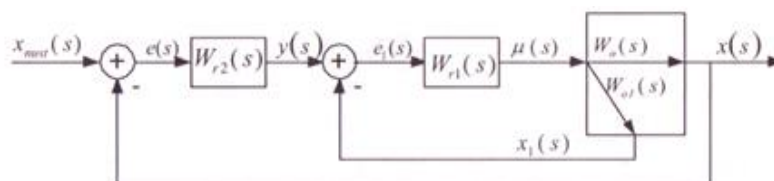
Sukūrus pirminį, tinkamai veikiančią matematinį modelį, reikia spręsti problemą – modelio adekvatumą. Tikslinga modelį tobulinti: nustatyti modelio reikšmes ir atlikti eksperimentinių duomenų analizę. Kai yra gaunami pirminio veikiančio matematinio modelio imitaciniai rezultatai, svarbu nuspręsti – ar tinkamai yra sumodeliuota modelio struktūra. Jei yra pastebimi nemaži sisteminiai skirtumai tarp imitacinių rezultatų ir eksperimentinės duomenų analizės rezultatų, objekto struktūrą reikalinga koreguoti. Jei sisteminių skirtumų nepastebima – modelio struktūra yra sumodeliuota tinkamai. Tuomet reikia nustatyti tinkamus parametrus, kuriais sumodeliuotą matematinį modelį būtų įmanoma priversti prie tyrimo objekto, t.y., kad vykdomo tyrimo modeliuojami rezultatai atitiktų eksperimentinius rezultatus, arba būtų nedaug nuo jų nukrypę.[7][9]

1.5 Valdymo sistemos

1.5.1 Tiesioginio ir grįžtamojo ryšio valdymo sistemos

Praktikoje periodiniai su pamaitinimu fermentaciniai procesai dažniausiai valdomi naudojant atvirąsias arba tiesioginio ryšio sistemas. Yra sudaroma pamaitinimo trajektorija, kuri yra realizuojama fermentacinio proceso metu. Atvirojo kontūro sistemos negali reaguoti į trikdžius, atsirandančius fermentacinio proceso metu. Tam taikomos uždarojo kontūro valdymo sistemos, kurios įvertina proceso metu atsirandančius trikdžius. Grįžtamojo ryšio valdymo sistemos biotechnologiniuose procesuose taikomos technologiniams parametrų valdyti: ištirpusio deguonies koncentracijai, pH, temperatūrai.[10][12]

Pateikiama viena iš literatūroje [11] aprašytos automatinės reguliavimo sistemos struktūrinė schema. Kaskadinės automatinio reguliavimo sistemos struktūrinė schema pateikiama žemiau:



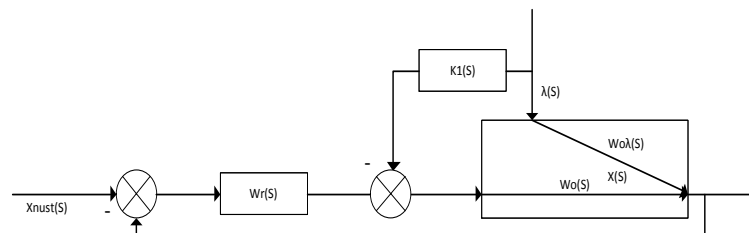
1.1 pav. Kaskadinė ARS struktūrinė schema

Schemoje: $X_{nust}(s)$ – nuostatas; $W_{r2}(s)$ – koregavimo reguliatoriaus perdavimo funkcija; $W_{r1}(s)$ – stabilizavimo reguliatoriaus perdavimo funkcija; $W_o(s)$ – objekto perdavimo funkcija; $W_{o1}(s)$ – objekto perdavimo funkcija; $X(s)$; $Q_{p(s)}$ – reguliuojamas parametras.

Pakopinę ARS sistemą sudaro du reguliatoriai: R_1 ir R_2 , kurie reguliuoja atskirus kontūrus. Regulatorius R_1 , kurio perdavimo funkcija $W_{r1}(s)$, taip stabilizuoja tarpinį parametą x_1 , kad jis atitiktų pagrindinio reguliatoriaus R_2 išėjimo dydį y . R_2 regulatorius, kuris reguliuoja pagrindinį parametą x , veikia ne poveikio elementą, o keičia reguliatoriaus R_1 nuostatą. ARS pakopinės sistemos tarpinis išėjimas, kurio vėlavimas ir inertiškumas yra mažesni negu pagrindinio išėjimo.[10][11]

1.5.2 Trikdžių kompensavimo valdymo sistemos

Šios valdymo strategijos taikomos žinomiems, procesą veikiantiems trikdžiams kompensuoti. Taikant šias strategijas, reguliuojančias ištirpusio deguonies koncentraciją, būtina tiksliai nustatyti kompensatoriaus funkciją, t.y. kaip keisis reguliatoriaus išėjimo dydis priklausomai nuo matuojamo trikdžio. Tokios valdymo sistemos gali kompensuoti su laiko uždelsimu susietus trikdžius. Automatinėse sistemose, kurios veikia trikdžio kompensavimo principu, valdymo poveikis formuojamas išmatavus objektą veikiantįjį trikdį. Funkcinės uždaros trikdžių kompensavimo sistemos pavyzdys pateikiamas (1.2 pav.)[10][11]



1.2 pav. Funkcinė uždaro trikdžio kompensavimo reguliavimo sistema.

Čia: $W_o(S)$ - objekto perdavimo funkcija reguliuojamo poveikio atžvilgiu; $W_o\lambda(S)$ - objekto perdavimo funkcija trikdžio atžvilgiu; $K_1(S)$ - trikdžio kompensavimo įtaiso perdavimo funkcija; $X(S)$ - reguliuojamasis parametras; $\lambda(S)$ - trikdys; $X_{nust.}(S)$ - nustatytojo reguliuojamojo parametro vertė.

1.5.3 Adaptyvusis valdymas

Adaptyvus valdymas – regulatorius, kurio parametrai derinami nepertraukiamai, pritaikant prie proceso dinamikos ir trikdančiųjų poveikių pakeitimo. Regulatoriaus parametrai gali būti derinami netiesiogiai arba tiesiogiai įvertinamais proceso parametrais, realiuoju laiku. Gali būti tiek grįžtamojo ryšio, tiek tiesioginio ryšio valdymo sistemų reguliatorių derinimo parametrų adaptacija.[10][12]

Adaptyvios valdymo sistemos tikslas – suteikti tikslų valdymą, automatiškai keičiant valdiklio parametrus ar struktūrą, pasikeitus valdomam objektui. Tiek objektas, tiek valdiklis standartiškai aprašomi matematinėmis lygtimis. Adaptyvus valdymas paremtas pagrindinėmis sistemų stabilumo, optimalaus valdymo ar kitais kriterijais. Siekiama surasti identifikavimo ir valdymo algoritmus sudėtingoms sistemoms dirbančioms stipriai kintančioje aplinkoje. Valdomi pramoniniai objektai gali būti išskirti į dvi dalis. Viena jų – pastovios gamybos sistemos (cheminiai reaktoriai, distiliacinės kolonos). Tokių sistemų dinamika kinta lėtai laike. Žaliavų pakitimai, produkcijos planavimas gali reikalauti pakeisti sistemos dinamiką.

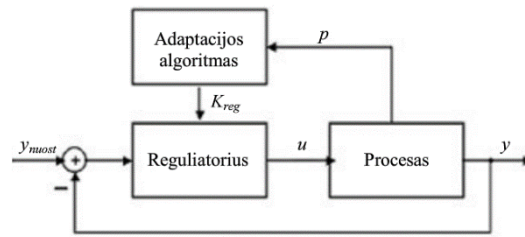
Antra grupė – diskretinių pasekmių valdomos sistemos. Palyginus su pastoviomis sistemomis, diskretinės sistemos gali būti atvaizduotos tam tikru tašku laike.

1.5.3.1 . Adaptyvaus valdymo schemos

Vienas iš uždavinių – surasti realų parametrų modifikavimo būdą adaptyviose sistemose. Parametrų pritaikymo valdymas gali būti aprašomas trimis populiariausiomis taisyklėmis: „stiprinimo numatymas“, „modelio charakteristikų valdymas“, „automatiškai susireguliuojantis valdymas“.

- Stiprinimo numatymas

Daugelyje pramonės sistemų sistemos dinamika (stiprinimas, laiko kintamosios, vėlinimas) priklauso nuo produkcijos gamybos sąlygų. Jei galima rasti svarbiausius kintamuosius, nusakančius sistemos būseną ir susijusius dinamikos nustatymus, galima sudaryti taisyklę tarp parametrų ir kintamųjų. Anksčiau stiprinimas laikytas papildomu kintamuoju. Pagrindinis privalumas – nereikalingas on-line identifikavimas, dinaminė reakcija daug greitesnė nei kitų metodų. Visgi, daug laiko reikalaujantis darbas – surasti teisingus kiekinius ryšius tarp sistemos parametrų ir stiprinimo, atsižvelgiant į stabilumą. Reikalinga daug modeliavimo bandymų. Stiprinimo numatymas – atviro kontūro tipo modifikacija.[10]



1.3 pav. Stiprinimo nustatymu paremtos valdymo sistemos struktūra.

- Adaptyvaus valdymo schemas: referencinio modelio taikymas.

Referencinio modelio taikymo principas – sukurti uždaro kontūro sistemą, kurios parametrus būtų galima atnaujinti pagal reikiamą modelį. Tokia sistema susideda iš pavyzdinio modelio (kurio pagalba surandami reikiami param.) ir uždaro kontūro sistemos. Sistemos tikslas – priversti realią sistemą kopijuoti modeliuojamos sistemos išėjimą.

Svarbiausias žingsnis – teisingo parametų keitimo mechanizmo sukūrimas. Dažnai naudojamos paklaidų gradientu paremtos taisyklės. Lyginant su stiprinimo nustatymu, uždaro kontūro sistemos, ir jos poveikis gali būti pakeistas keičiant parametų keitimo greitį.[10]

- Adaptyvaus valdymo schemas: susiderinantis reguliatorius

Susiderinančio reguliatoriaus valdymas susidaro iš grįžtamojo ryšio, estimatoriaus parametų ir reguliatoriaus sukūrimo. Norint įdiegti susiderinantį reguliatorių, būtina pasirinkti realaus laiko parametų nuspėjimo metodą, aktyvius testavimo signalus. Tokios sistemos veikimas priklauso nuo parametų spėjimo tikslumo bei proceso modelio tikslumo. Norint metodą pritaikyti praktiškai, reikia ištirti:

- parametų nustatymą uždaramame kontūre;
- kriterijų pasirinkimą valdymo algoritmo sudarymui;
- valdymo algoritmų parinkimą adaptyviam valdymui, kurie yra identifikuojami bei turi pakankamą poveikį.[10]

1.5.4 Adaptyvaus valdymo reguliatoriaus derinimo metodai

Adaptyvus valdymo reguliatoriaus parametrai gali būti derinami netiesiogiai arba tiesiogiai:

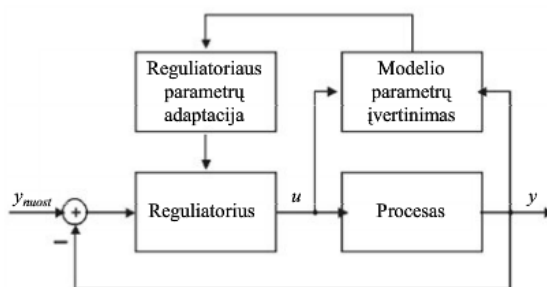
- Tiesioginis adaptyvus valdymas

Adaptacija yra ypač svarbi tiesioginio ryšio reguliatoriams. Tai labai gerai veikiantis metodas – sistemą trikdančieji poveikiai gali būti išmatuoti. Tiesioginio ryšio valdymo sistemoms realizuoti taip pat reikia sudaryti adekvačius proceso dinamikos modelius. Šias sistemas gana sudėtinga suderinti, dažniausiai yra neįmanoma sukurti reikalingus išorinius trikdžius. Norint tinkamai suderinti tiesioginio ryšio reguliatorių, būtina sulaukti atitinkamo trikdančiojo poveikio.[10]

- Netiesioginis adaptyvus valdymas

Netiesioginio valdymo atveju, adaptyvumo įdiegimas išskaidomas į du tarpsnius. Sistemos valdymo funkcijos ir parametrų vertės randamos remiantis identifikuotu modeliu, siekiamais valdymo kriterijais ir apribojimais.

Identifikavimo metodas gali būti įvairus: pradedant paprasta šuoline reakcija, baigiant sudėtingesniais metodais. Vienas iš sudėtingiausių uždavinių – bandymo signalų pridėjimas į realią sistemą, siekiant kuo mažiau paveikti normalią darbo būseną bei produkto kokybę, nepriklausomai koks realaus laiko identifikavimo metodas naudojamas.[10]



1.4 pav. Netiesioginio derinimo sistemos blokinė schema

2 Metodologinė dalis

Tyrimas atliktas remiantis literatūroje [1][3] pateiktu biotechnologiniu procesu, vykstančiu naudojant periodinį su pamaitinimu bioreaktorių. Bendra procesų trukmė - dvylika valandų. Vykstant šiam procesui, pagrindinis tikslas – biomasės gamyba panaudojant atitinkamus substratų kiekius. Atliekant tyrimą į medžiagų ir bakterijų rūšis atsižvelgiama nėra. Naudojantis bioproceso matematinio modeliu pagrindinis darbo tikslas - ištirti biomasės profilių sistemų sekimą panaudojant skirtingas reguliavimo sistemas, veikiant jas trikdžiams.

2.1 Matematinis modelis

Matematinis modelis yra grindžiamas masės balanso lygtimis, kintančiomis parametru vertėmis biotechnologinio proceso metu. Masės balanso lygtys yra modelio pagrindas, nuo kurio prasideda modeliavimo darbas. Svarbus aspektas - vykstančiam biotechnologiniam procesui masės balanso lygtys turi būti adekvačios.

Matematinio modelio lygtys [1][3], kurios bus simuliuojamos Matlab/Simulink paketu:

Biomasės koncentracijos lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = \mu(s, T)x - (u + F1) \frac{x}{w} \quad (17)$$

Substrato koncentracijos lygtis:

$$\frac{ds}{dt} = -qs(s)x + u \frac{x}{w} - (u + F1) \frac{s}{w} \quad (18)$$

Rekombinuotų baltymų koncentracijos lygtis:

$$\frac{dpx}{dt} = qp(x, \mu, px) \quad (19)$$

Kultyvavimo terpės tūrio lygtis:

$$\frac{dw}{dt} = U + F1 + F2 \quad (20)$$

Santykinio biomasės augimo greičio lygtis:

$$\mu(s, T) = \mu_{\max} \frac{s}{K_S + s} \frac{K_i}{K_i + s} \exp(Kt(T - T_{ref})) \quad (21)$$

Substrato santykinio suvartojimo lygtis:

$$q_s(s) = \frac{1}{Y_{xs}} \mu(s, T) + m \quad (22)$$

Rekombinuotų baltymų koncentracijos kitimo greičio lygtis:

$$q_{px}(\mu, p_x) = \frac{1}{T_{px}} (p_{\max}(\mu) - p_x) \quad (23)$$

Funkcinė priklausomybė, parodanti maksimalią pasiekiamo tikslinio baltymo koncentraciją stacionariame režime, kaip priklausomybė nuo santykinio greičio lygtis:

$$p_{\max}(\mu) = \frac{\mu K_m}{K_\mu + \mu + \mu^2 / K_{i\mu}} \quad (24)$$

Deguonies suvartojimo greičio lygtis:

$$OUR = \alpha \mu x_w + \beta x_w \quad (25)$$

x - biomasės koncentracija [g/kg], s - substrato koncentracija [g/kg], p_x - rekombinuotų baltymų koncentracija [U/g], w - yra kultivavimo terpės masė [kg], μ - santykinis biomasės augimo greitis [1/h], u - substrato maitinimo greitis [kg/h], $F1$ - patenkančios į bioreaktorių masės srautas [kg/h], $F2$ yra iš bioreaktoriaus imamų mėginių masės srautas [kg/h], T kultivavimo terpės temperatūra [$^{\circ}$ C], OUR - deguonies sunaudojimo greitis [g/kg/h] [3]

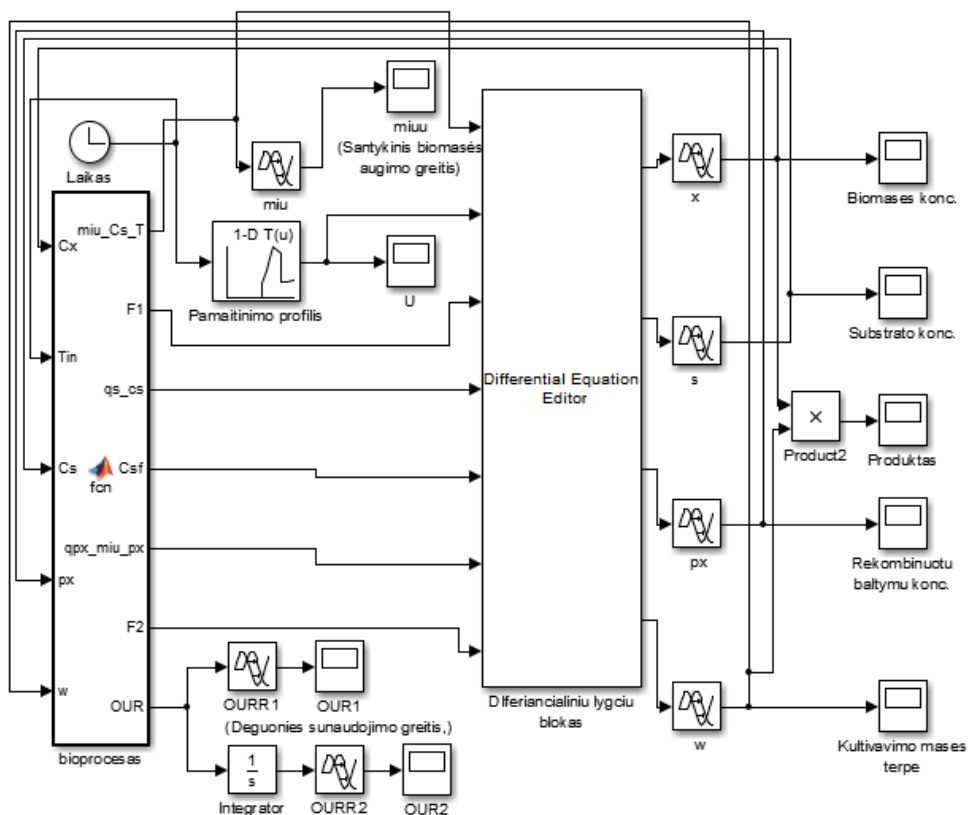
2.1 lentelėje pateikiamos modelio parametrų vertės: K_i , K_s , K_m , K_μ , $K_{i\mu}$, K_t , Y_{xs} , m , T_{px} , α , β , μ_{\max} , kurios buvo naudojamos pradiniam matematiniam modeliui modeliuoti pateiktos literatūroje[3]:

2.1 lentelė Pradinės modeliavimo vertės

Parametras	Parametro vertė	Matavimo vnt.
k_i	0.938	g/kg
$k_{i\mu}$	0.0174	l/h
k_m	751	U/g
k_μ	0.61	l/h
k_s	0.0333	g/kg
m	0.0242	g/l

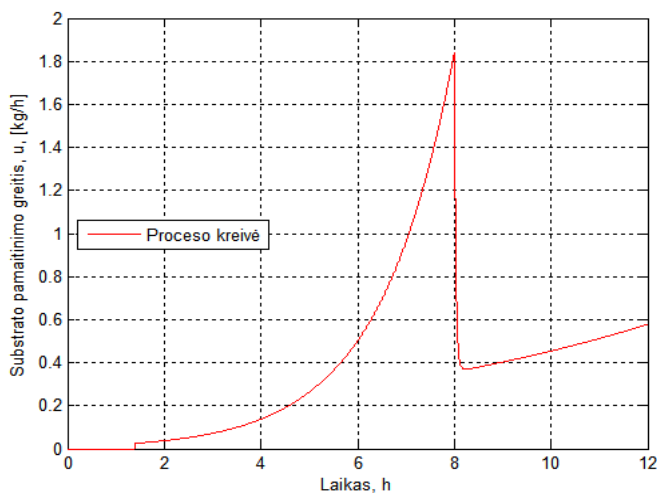
csf	151	g/kg
T _{px}	1.495	h
Y _{xs}	0.46	g/g
α	0.5/0.75	g/g
β	0.15/0.015	g/g/h
μ _{max}	0.737	1/h
K _t	0.0495	1/°C
T	32	°C
T _{ref}	37	°C
X(0)	0.2	g/kg
S(0)	1	g/kg
W(0)	5	g/kg
T _{ind}	8	h

Matlab/Simulink pakete sumodeliuotas matematinis modelis su **2.1 lentelėje** esančiomis parametų vertėmis. Proceso modelio schema atvaizduojama (**2.1 pav.**) Matlab programos kodas pateikiamas **1 priede**.



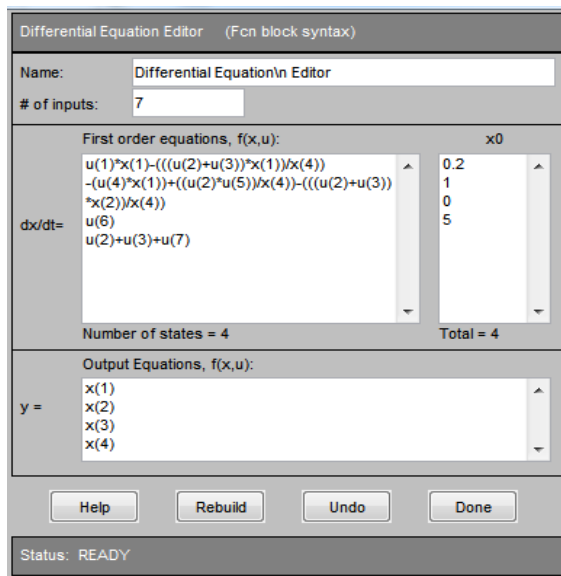
2.1 pav. Bioproceso matematinis modelis Matlab/Simulink aplinkoje

Naudojantis literatūroje [1] detalizuojamu substrato pamaitinimo greičio profiliu, buvo sugeneruotas pamaitinimo greičio profilis – grafikas (**2.2 pav.**).



2.2 pav. Substrato pamaitinimo greitis, kg/h

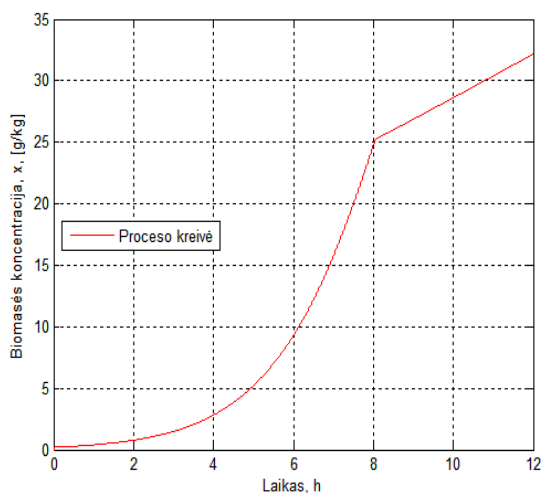
Bioproceso matematinio modelio funkcinis –blokas DEE (Diferent Equation Editor), kuriame kiekvienos medžiagos koncentracijos kitimas, remiantis masės balansu lygtimis, aprašytos diferencialinėmis lygtimis.



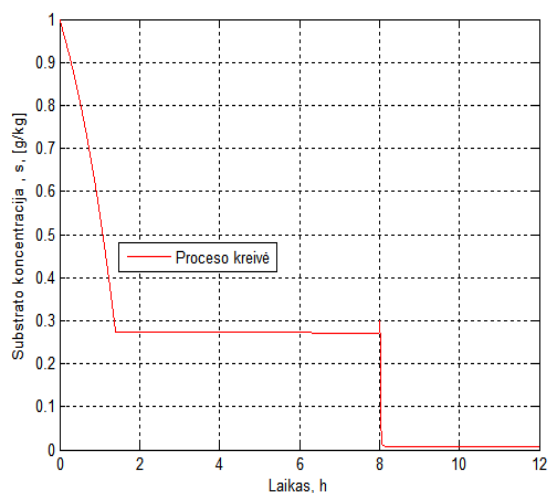
2.3 pav. DEE blokas Matlab/Simulink aplinkoje

2.2 Biotechnologinio proceso modeliavimo duomenys

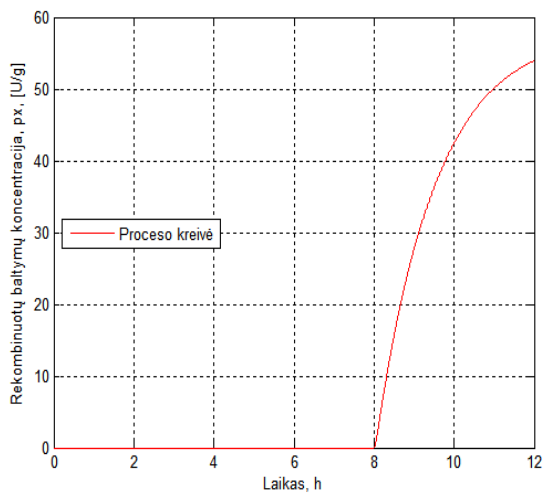
Kitas veiksmas atviroje proceso sistemoje – imitacinio modelio būdu buvo sumodeliuojami referenciniai biologinio proceso profiliai: biomasės koncentracija – grafikas (2.4 pav.), substrato koncentracija – grafikas (2.5 pav.), rekombinuotų baltymų koncentracija – grafikas (2.6 pav.), deguonies sunaudojimo greitis – grafikas (2.7 pav.), integralinis deguonies sunaudojimo greitis – grafikas (2.8 pav.), biomasės kiekio – grafikas (2.9 pav.), santykinis biomasės augimo greitis – grafikas (2.10 pav.).



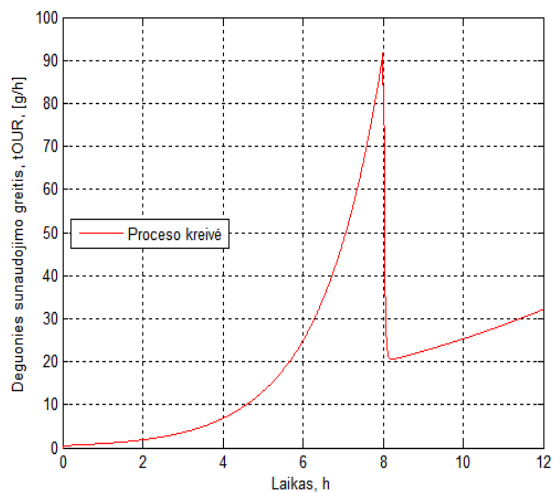
2.4 pav. Biomasės koncentracija, g/kg



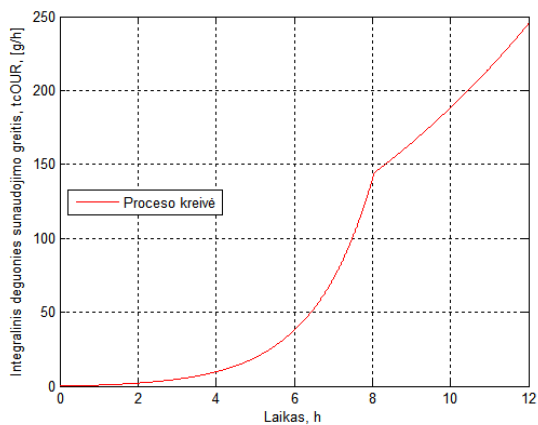
2.5 pav. Substrato koncentracija, g/kg



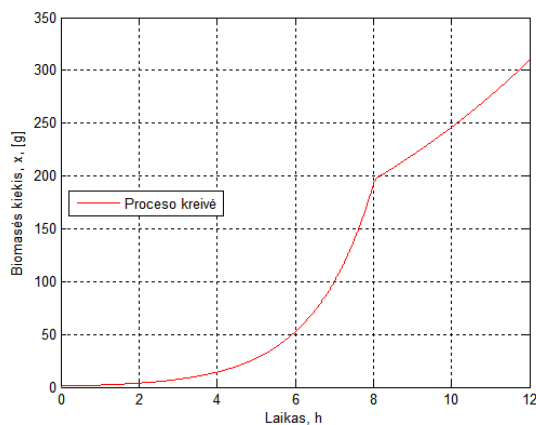
2.6 pav. Rekombinuotų baltymų koncent.,
kg/h



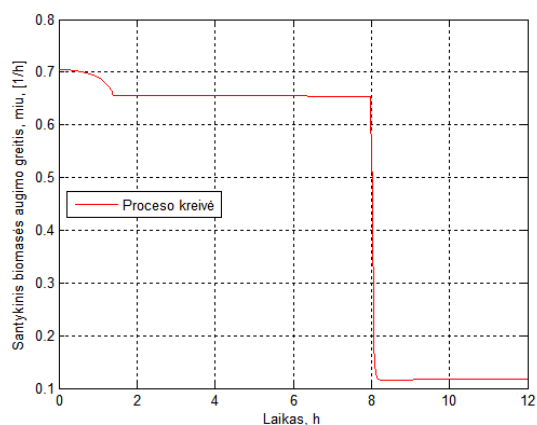
2.7 pav. Deguonies sunaudojimo greitis, g/h



2.8 pav. Integralinis deguonies sunaudojimo
greitis g/h



2.9 pav. Biomosės kiekis, kg



2.10 pav. Santykinis biomasės augimo greitis,
1/h

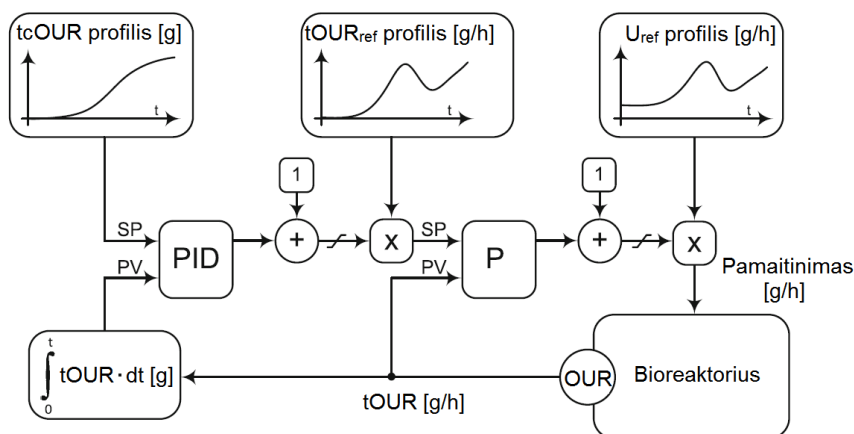
2.3 Biomases profilio sekimo sistemos

Reguliavimo sistemos tikslas – palaikyti optimalius santykinio biomasės augimo greičio $-\mu_{ref}$, deguonies sunaudojimo greičio OUR_{ref} , bei biomasės kiekio profilius, veikiant įvairiems neprognozuojamiems proceso trikdžiams. Matlab/Simulink pakete buvo sumodeliuotos dvi reguliavimo sistemos:

- pirmoji - pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje (**2.11 pav.**)
- antroji - pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje (**2.12 pav.**)

2.3.1 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje

Automatinio reguliavimo sistema pavaizduota (**11. pav.**) buvo sukurta pagal literatūroje [2] publikuojamą sistemą. Deguonies sunaudojimo greičio vertė yra greitas rodiklis pranešti apie ištikusius pokyčius biotechnologinio augimo procese. Valdymo sistemoje išorinis reguliatorius PID užduoda OUR nustatą vidinio kontūro reguliatorių P, kuris valdo pamaitinimo greitį U_{ref} į bioreaktorių.



2.11 pav. Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje

Kintamieji: biomasės kiekis X , deguonies suvartojimo greitis $tOUR(t)$, $tcOUR(t)$, ir substrato pamaitinimo greitis $U_{ref}(t)$ gali būti apskaičiuojami pasitelkiant šias lygtis[2].

$$x(t) = \int_0^t \mu_d(t)x dt \pi r^2 \quad (26)$$

$$tCPR(t) = Y_{cx}\mu_d(t)x(t) + m_c x(t) \quad (27)$$

$$tcCPR(t) = \int_0^t tCPR(t) dt \quad (28)$$

$$F_{ref}(t) = \frac{\mu_d(t)x(t)}{Y_{xs}S_0} \quad (29)$$

Čia Y_{cx} , m_c , Y_{xs} biotechnologinio proceso modelio parametrai. S_0 - pamaitinimo substrato koncentracija.

Sistemos reguliatoriai PID ir P buvo derinami klasikiniu metodu, naudojantis Ziegler-Nicols metodu.[4] Galutinai reguliatoriai suderinti naudojant atsitiktiniu paieškos metodu. Reguliatoriai buvo suderinti taip, jog gebėtų sekti užduotąjį profilį. **Lentelėse 2.1** ir **2.2** pateikiami reguliatorių parametrai.

2.1 lentelė P reguliatoriaus parametrai

Parametras	Reikšmė
P (proporcingoji dedamoji)	0,05

2.2 lentelė PID reguliatoriaus parametrai

Parametras	Reikšmė
P (proporcingoji dedamoji)	0,6
Ti (integruojanti laiko pastovioji)	0,6
Td (diferencijuojanti laiko pastovioji)	10

2.3.2 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje

Ši antroji reguliavimo sistema (**2.12 pav.**) yra realizuota pagal literatūroje [3] naudojamą reguliavimo sistemą.

Sistemoje naudojamas stiprinimo koeficientas (*GAIN scheduling*). Koeficientas buvo gautas iš proceso modeliavimo eksperimentų, suskirsčius biotechnologinį procesą į porą intervalų, kuriems buvo apskaičiuojami skirtingi *OUR* stiprinimo koeficiento parametrai.[3] Pritaikius stiprinimo koeficientą išoriniam bei vidiniam reguliavimo kontūrai, atitinkamai:

Išorinio reguliatoriaus kontūras:

$$K_P = 10/(1 + OUR) \quad (30)$$

Vidinio reguliatoriaus kontūras:

Biotechnologinio proceso metu iki 8 val.

$$K_{PI} = 0,5OUR + 0,1) \quad (31)$$

$$T_{PI} = 80/(OUR + 1) \quad (32)$$

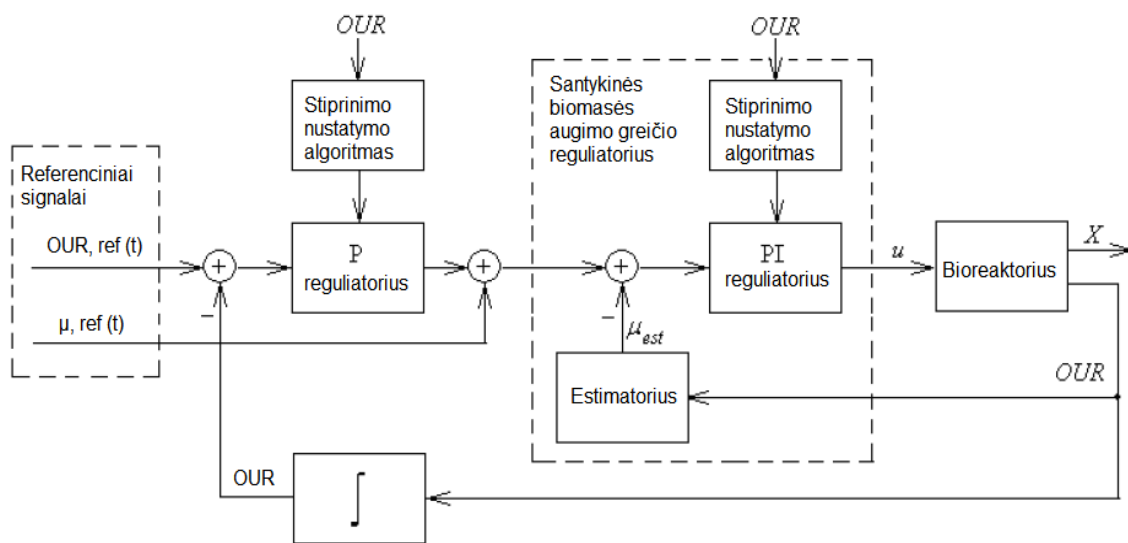
Biotechnologinio proceso metu nuo 8 val.

$$K_{PI} = 0,25OUR + 0,1) \quad (33)$$

$$T_{PI} = 80/(1 + OUR) \quad (34)$$

Čia K_P ir K_{PI} yra reguliatoriaus stiprinimo koeficientai P ir PI reguliatoriuose. Atitinkamai T_{PI} yra reguliatoriaus integravimo laikas I dedamoji, PI reguliatoriuje.

Toliau pateikiama pakopinės biomasės kiekio sekimo sistemos, su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje principinė schema:



2.12 pav. Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje

Reguliavimo sistemoje taip pat naudojamas estimatorius.[3] Šioje reguliavimo sistemoje estimatorius realiu laiku įvertina tiesiogiai nustatytą OUR koncentraciją, taip netiesiogiai įvertindamas santykinę biomasės augimo vertę. Estimatorius grindžiamas literatūroje [3] naudojamomis matematinėmis lygtimis: Remiantis Luedeking-Piret sąsaja,[3][5][6] deguonies

sunaudojimo greitis mikrobiologinėje terpėje reliatyvus nuo biomasės augimo, apibrėžiama tokiomis lygtimis:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (36)$$

$$OUR = \alpha \mu x + \beta x \quad (37)$$

Pastarosios lygties išvestinė nuo laiko:

$$\frac{dOUR}{dt} = \alpha \frac{d\mu}{dt} X + OUR * \mu \quad (38)$$

Deguonies sunaudojimo greičio kitimas pažymimas R:

$$R = \frac{1}{OUR} \frac{dOUR}{dt} \quad (39)$$

Dinaminė sąsaja tarp kintamųjų R ir μ apibrėžiama šia lygtimi:

$$R = \frac{1}{\mu + \beta/\alpha} \frac{d\mu}{dt} \quad (40)$$

Arba pirmosios eilės perdavimo funkcija:

$$G_{\mu/R} = \frac{\mu(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (41)$$

Čia s Laplaso transformacijos operatorius. T laiko pastovioji išreikšta santykiniai augimo greičiui:

$$T = \frac{1}{\mu + \beta/\alpha} \quad (42)$$

Iš (R) lygties gaunamas dinaminis ryšys tarp deguonies sunaudojimo greičio ir R apibrėžimas tokia perdavimo funkcija:

$$G_{R/OUR} = \frac{R(s)}{OUR(s)} = ks \quad (43)$$

Čia $k = \frac{1}{OUR}$. Panaudojant ($G_{\mu/R}$) ir ($G_{R/OUR}$) lygtis, galima netiesiogiai išmatuoti santykinio biomasės augimo greičio dydį, realiai matuojant OUR vertę.

Santykinio biomasės augimo greičio būsenos įvertinimo algoritmas:

$$G_{\mu/R} = \frac{\mu(s)}{R(s)} = \frac{ks}{Ts+1} \quad (44)$$

3 Tyrimo rezultatų palyginimas, rezultatų dalis

3.1 Tyrimo rezultatų palyginimas, kai trikdis – pamaitinimo substrato staigus sumažėjimas

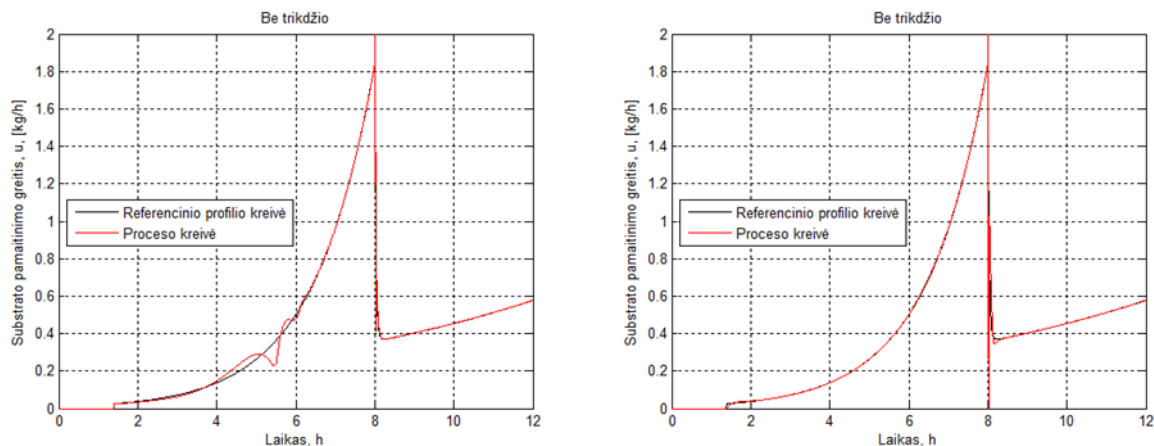
Imitacinio modelio pagalba buvo atliktas biomasės profilio sekimas, paremtas OUR matavimo metodu. Imituojamas trikdys – pamaitinimo substrato maksimalaus srauto staigus sumažėjimas (pvz., užstringa siurblys, arba užsikemša pamaitinimo žarnelė). Pirmosios sistemos (**2.11 pav.**) bei antrosios sistemos (**2.12 pav.**) palyginamos skirtinguose eksperimentuose:

- kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių;
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %.
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 75 %.
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %.
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 75 %.

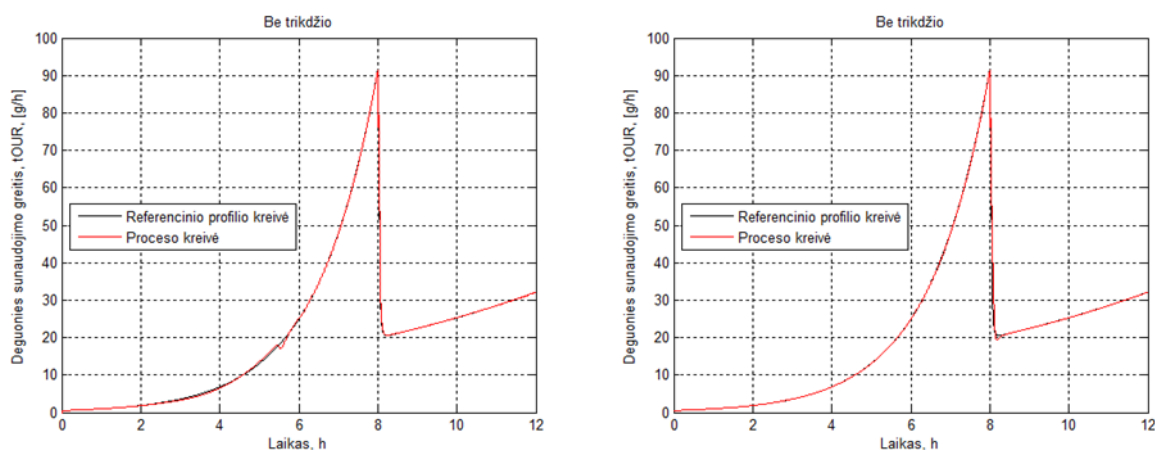
Tyrimo naudojamas (**2.2 pav.**) - grafike atvaizduotas bioproceso substrato pamaitinimo greitis. Imitaciniame modelyje skaičiavimo laikas naudojamas 12 val. Gauti rezultatai atvaizduojami pirmosios ir antrosios modeliuojamų sistemų grafikuose (**3.1-3.30 pav.**) : substrato pamaitinimo greičio, deguonies sunaudojimo greičio, integralinio deguonies sunaudojimo greičio, biomasės koncentracijos, biomasės kiekio, bei biomasės kiekio paklaidos.

3.1.1 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių

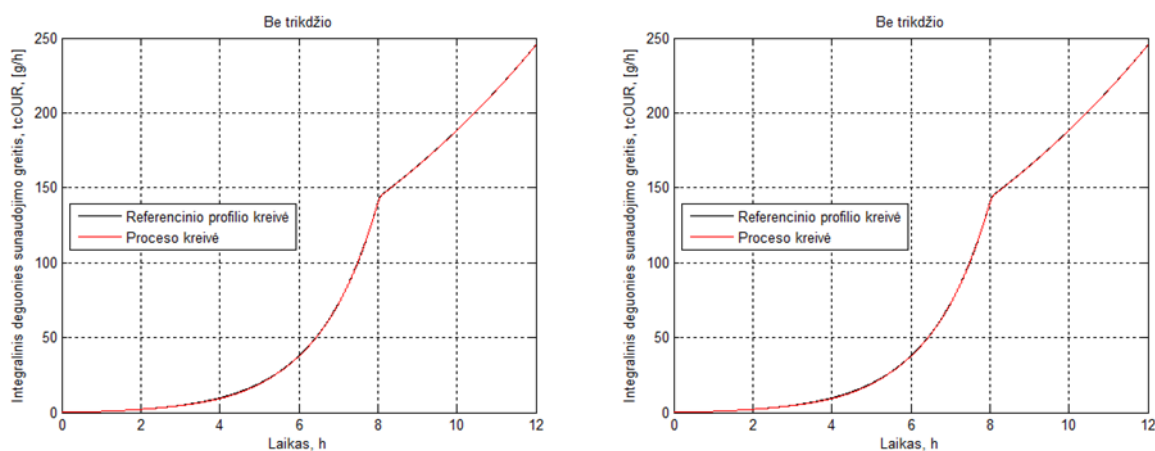
Žemiau pateikiami bioproceso pereinamųjų procesų grafikai (3.1–3.6 pav.), kai reguliavimo sistemos neįtakoja jokie išoriniai valdymo trikdžiai.



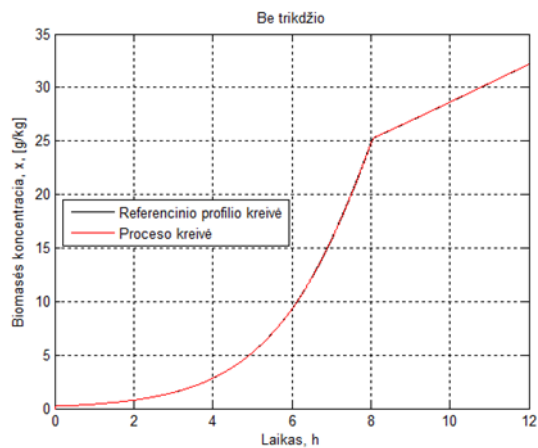
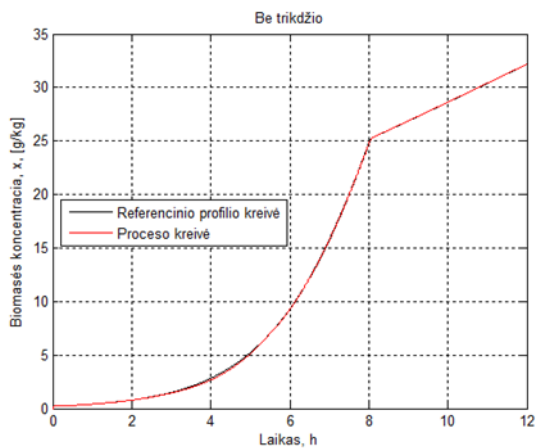
3.1 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų substrato pamaitinimo greičio, μ grafikai.



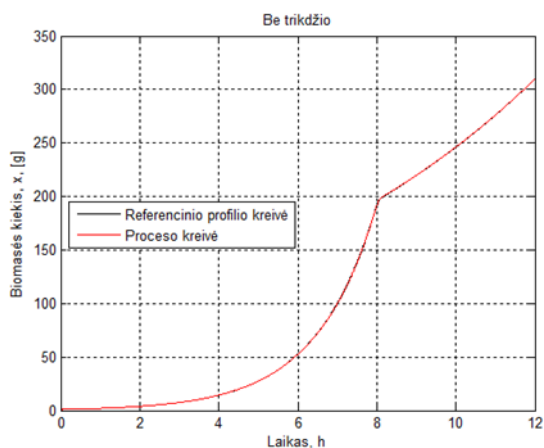
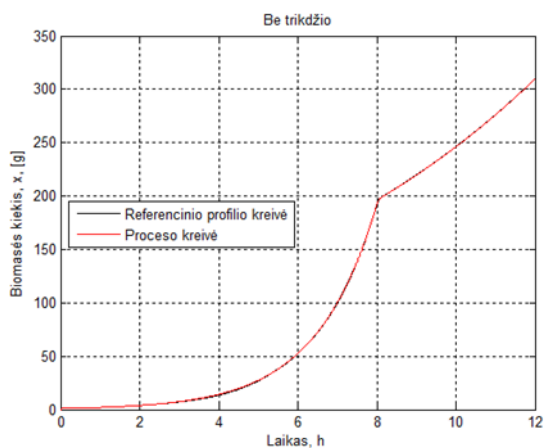
3.2 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų deguonies sunaudojimo greičio, tOUR grafikai.



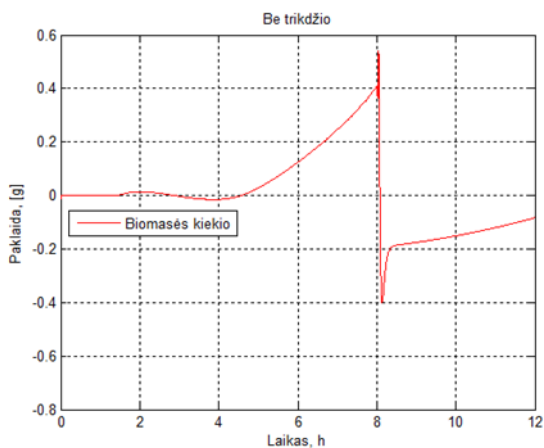
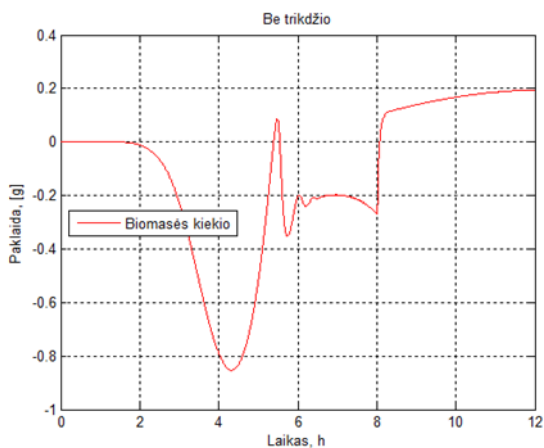
3.3 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų integralinio deguonies sunaudojimo greičio, tcOUR grafikai



3.4 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės koncentracijos, x grafikai



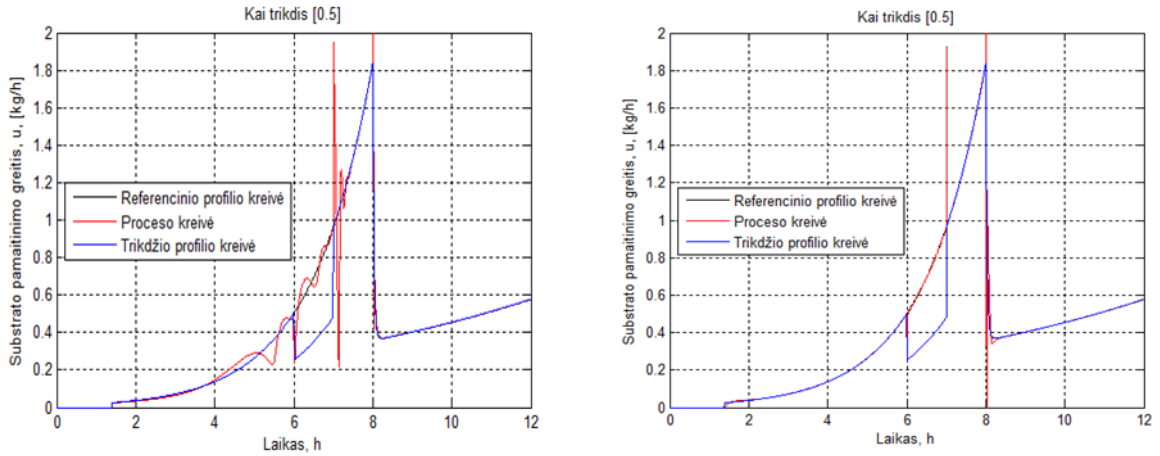
3.5 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



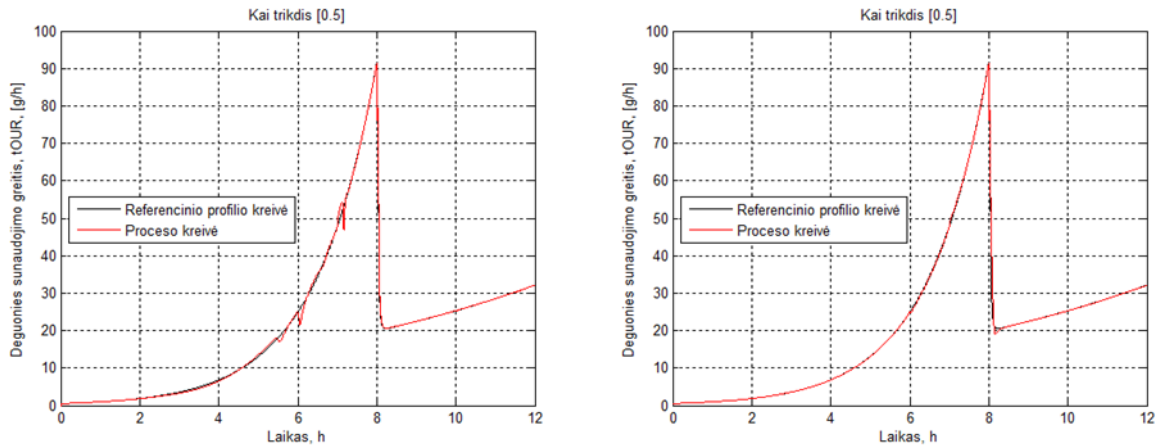
3.6 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.1.2 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 50 %.

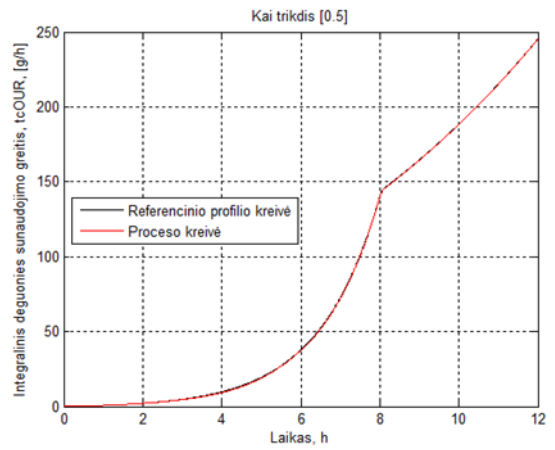
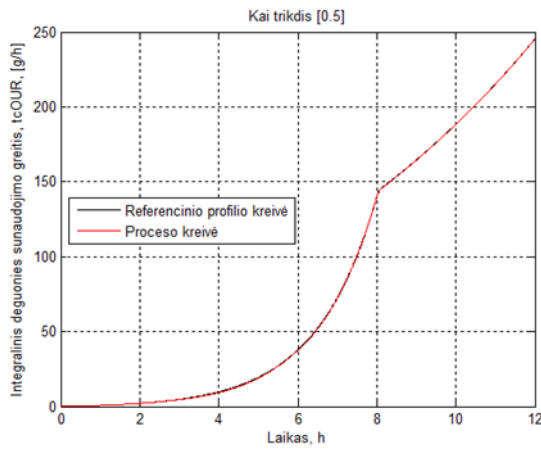
Toliau pateikiami bioproceso pereinamųjų procesų grafikai (3.7-3.12 pav.), kai veikia valdymo sistema ir yra imituojamas siurblio gedimas nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %.



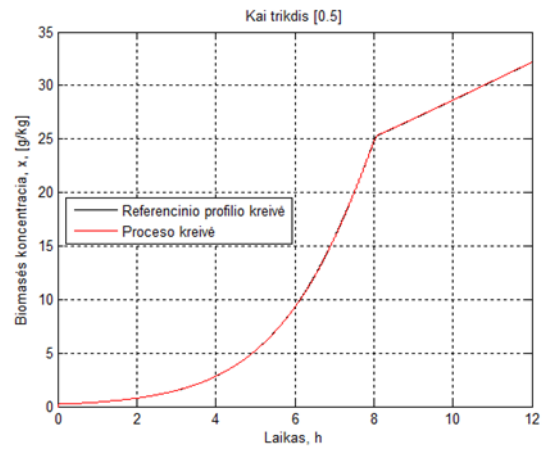
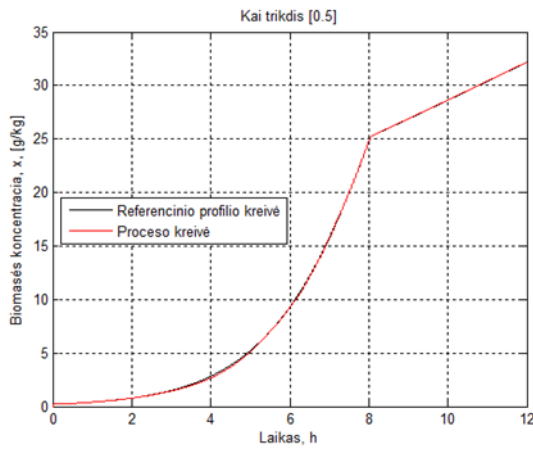
3.7 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų substrato pamaitinimo greičio, μ grafikai.



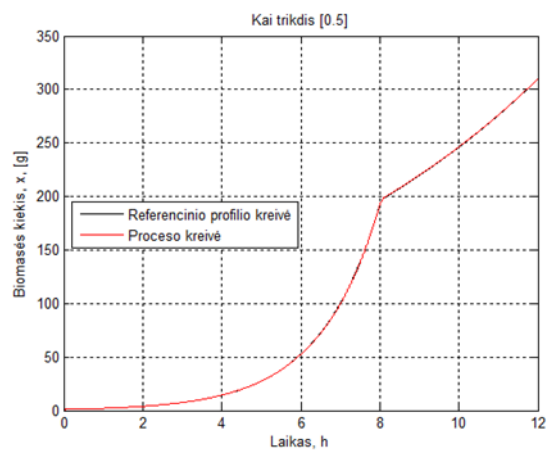
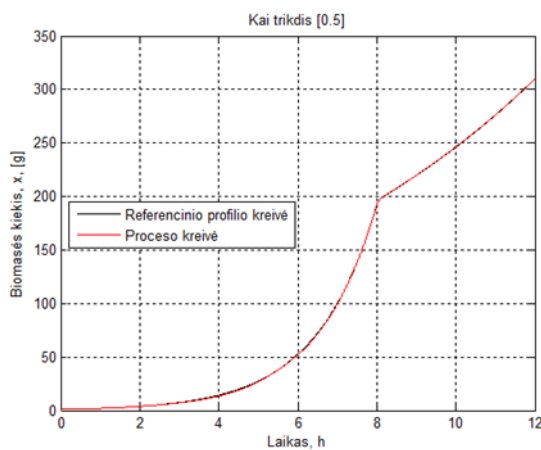
3.8 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų deguonies sunaudojimo greičio, tOUR grafikai.



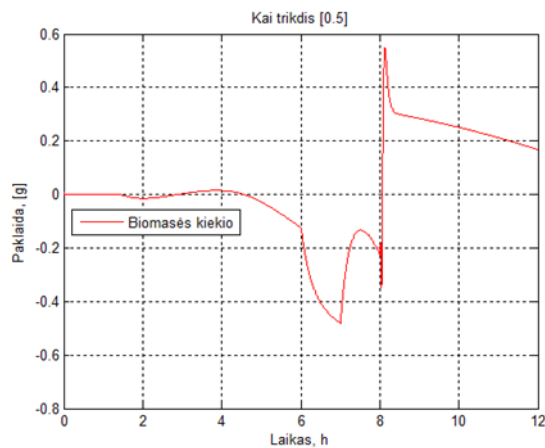
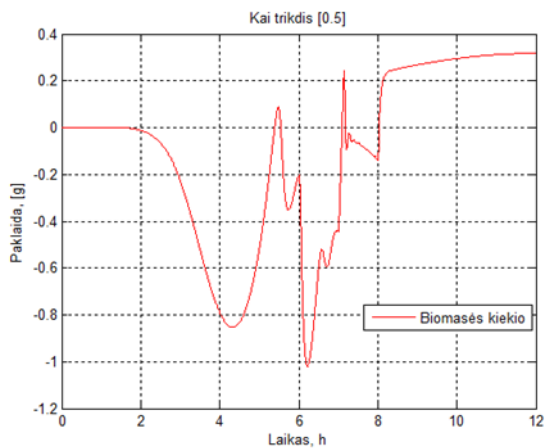
3.9 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų integralinio deguonies sunaudojimo greičio, tcOUR grafikai.



3.10 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės koncentracijos, x grafikai



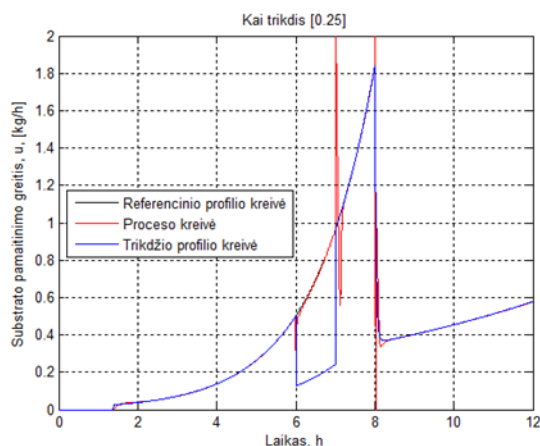
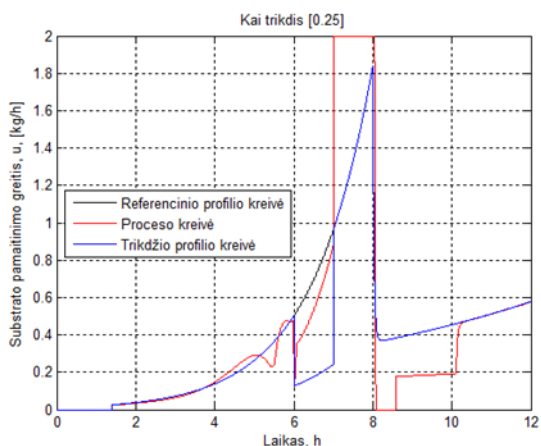
3.11 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekiu, X grafikai



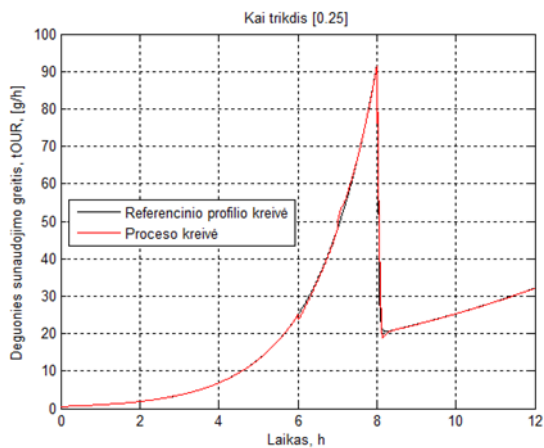
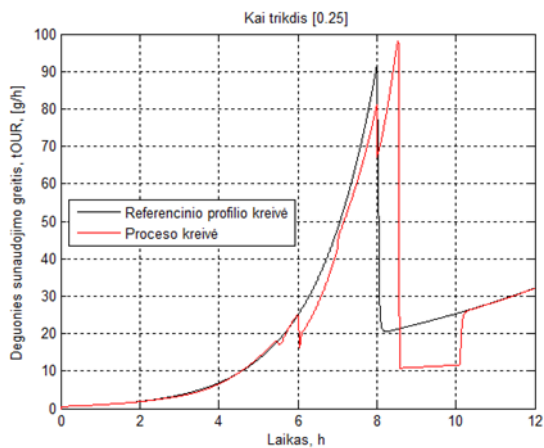
3.12 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.1.3 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substratas sumažėja 75 %.

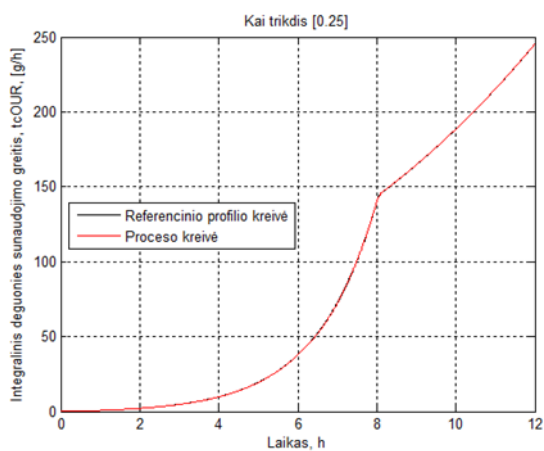
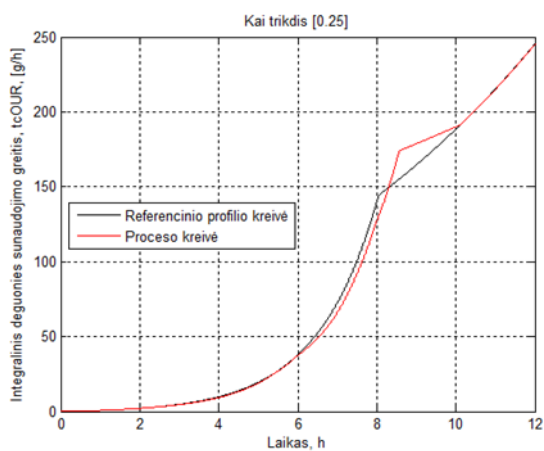
Grafikuose (3.13-3.18 pav.) pateikiamos bioproceso pereinamųjų procesų reakcijų kreivės, kai veikia valdymo sistema ir yra imituojamas siurblio gedimas nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja iki 75 %.



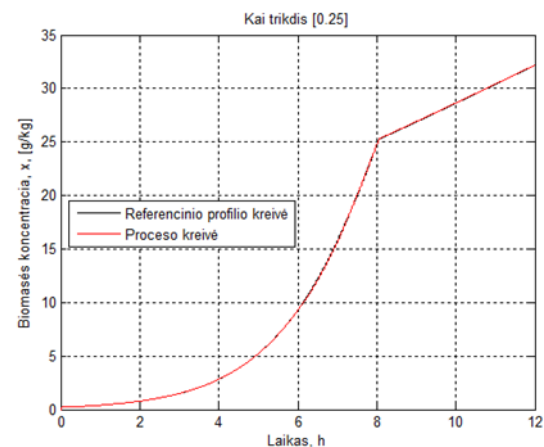
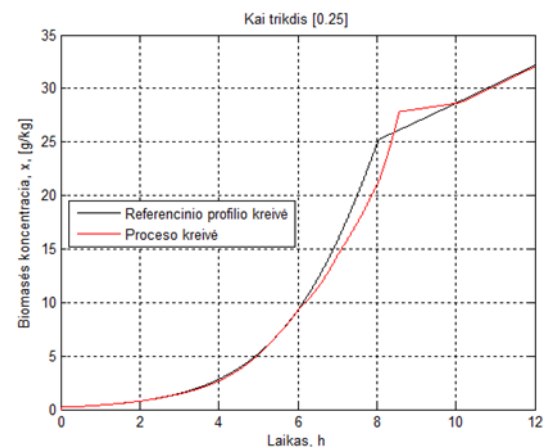
3.13 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų substrato pamaitinimo greičio, μ grafikai.



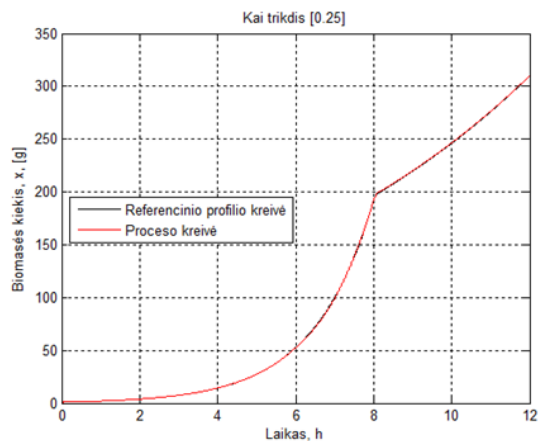
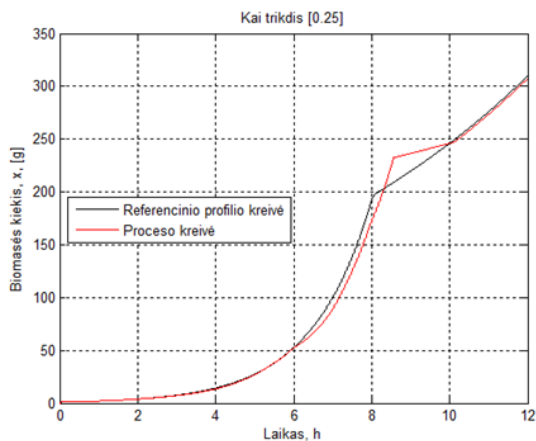
3.14 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų deguonies sunaudojimo greičio, tOUR grafikai.



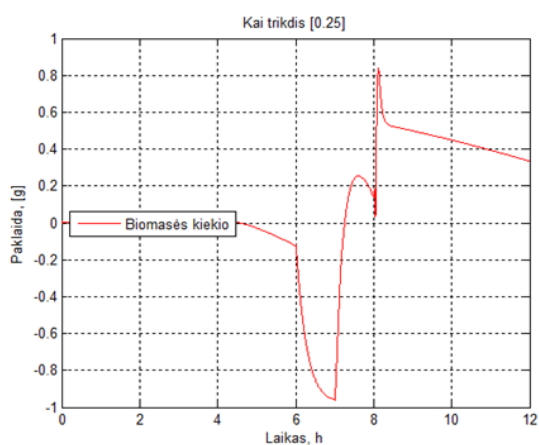
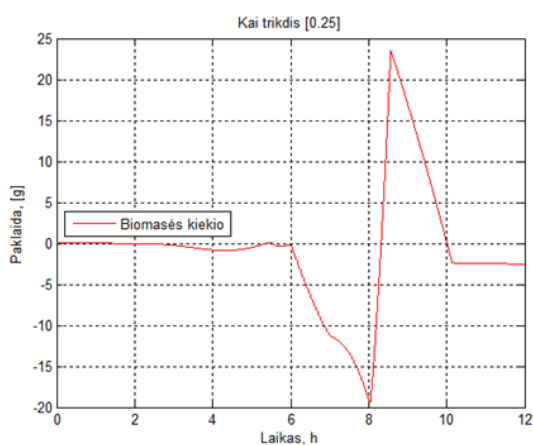
3.15 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų integralinio deguonies sunaudojimo greičio, tcOUR grafikai.



3.16 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės koncentracijos, x grafikai



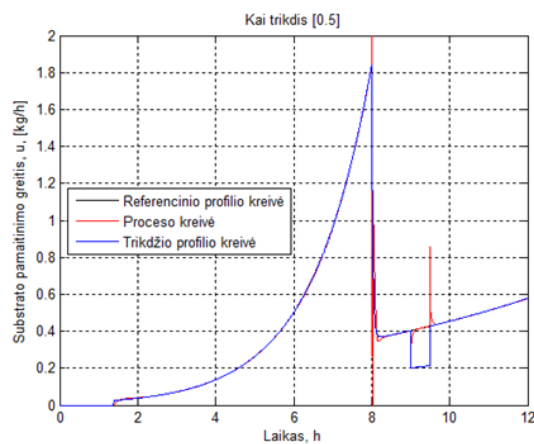
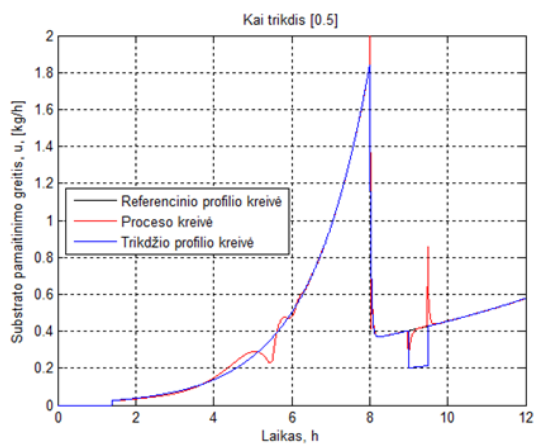
3.17 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



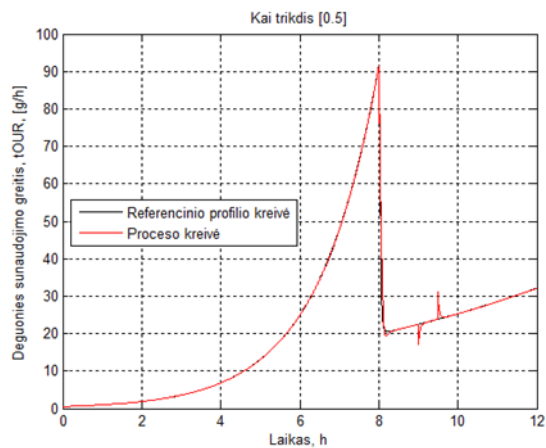
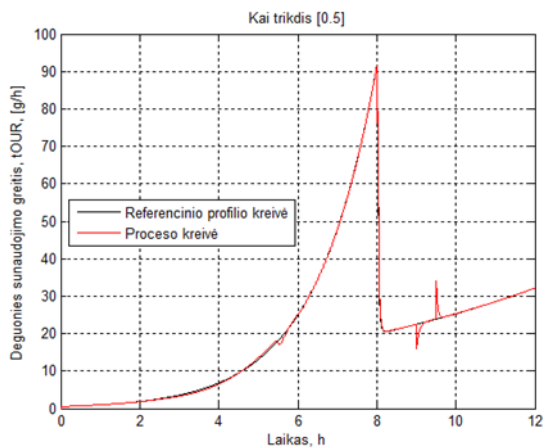
3.18 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.1.4 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %.

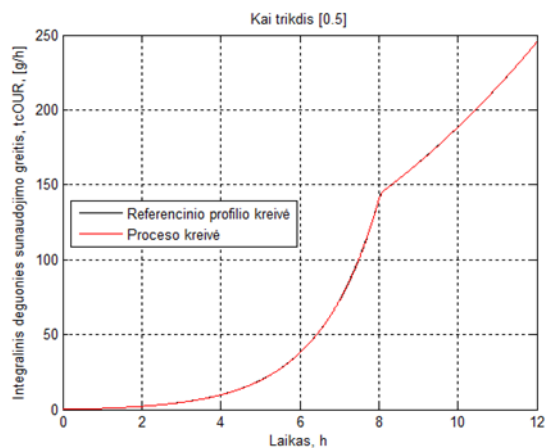
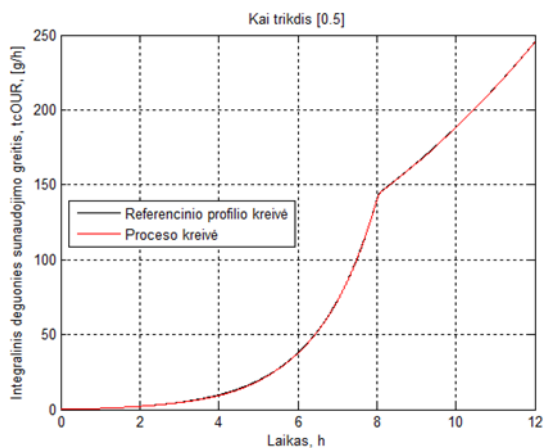
Žemiau pateikiami bioproceso pereinamųjų procesų grafikai (3.19-3.24 pav.), kai veikia valdymo sistema ir yra imituojamas siurblio gedimas nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %.



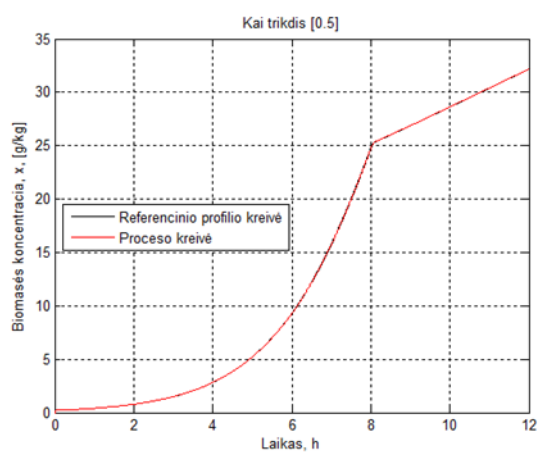
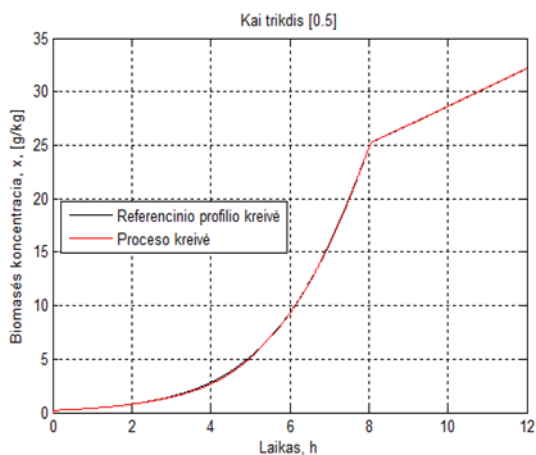
3.19 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų substrato pamaitinimo greičio, μ grafikai.



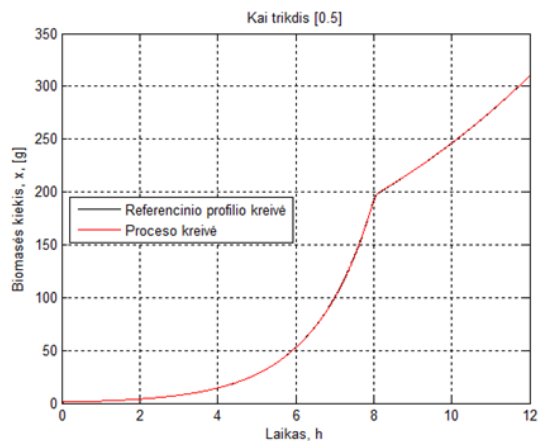
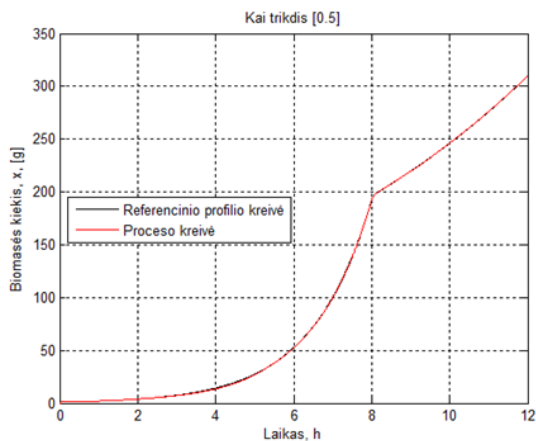
3.20 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų deguonies sunaudojimo greičio, tOUR grafikai.



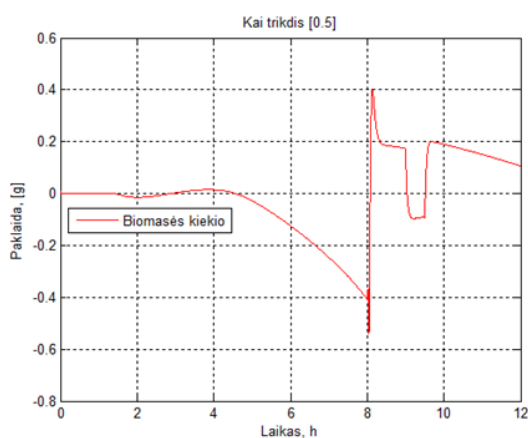
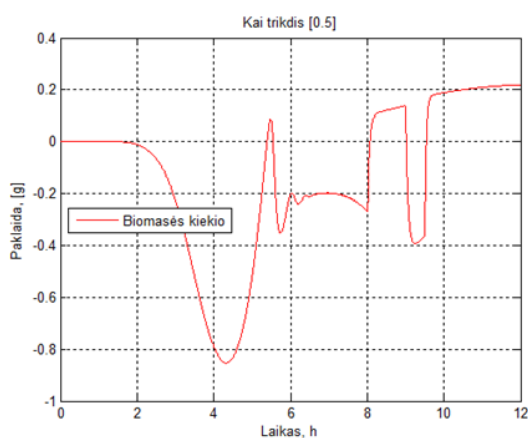
3.21 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų integralinio deguonies sunaudojimo greičio, tcOUR grafikai.



3.22 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės koncentracijos, x grafikai



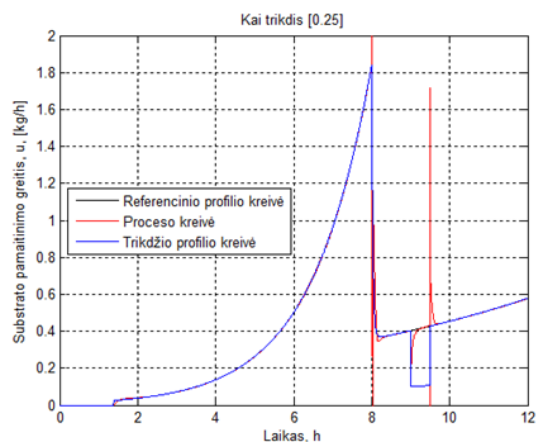
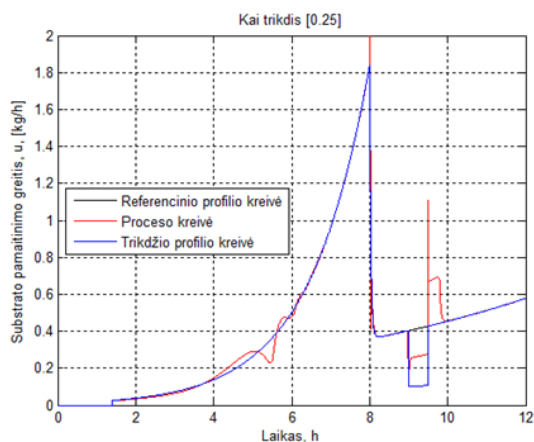
3.23 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



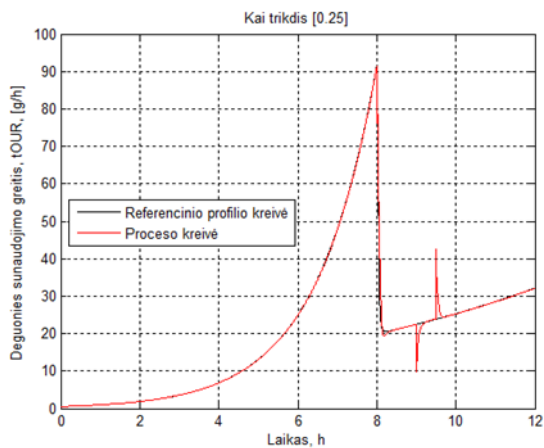
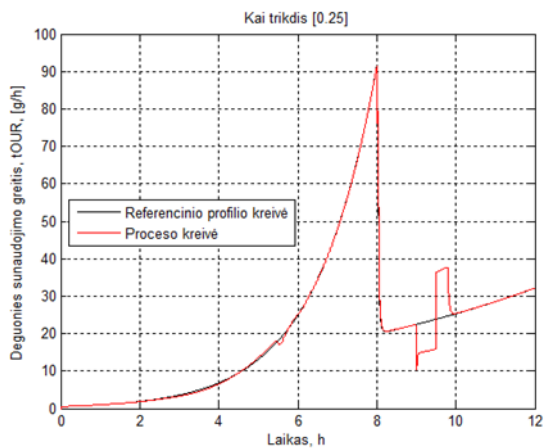
3.24 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.1.5 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 75 %.

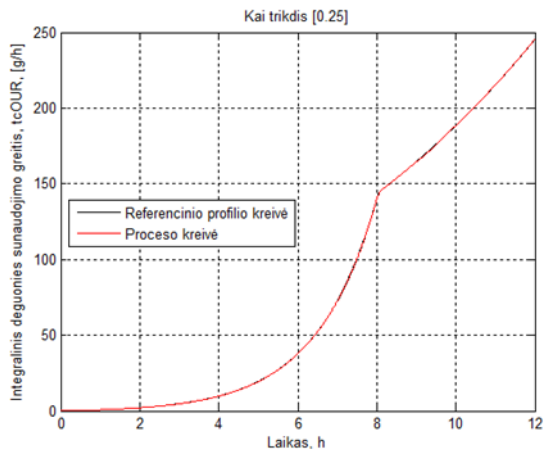
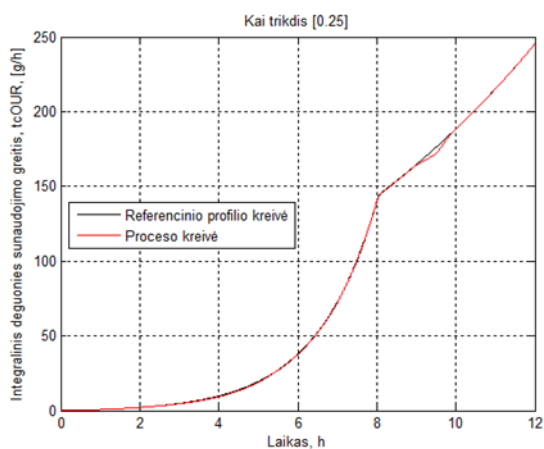
Paskutinio eksperimento grafikuose (3.25-3.30 pav.), pateikiamos abiejų bioproceso pereinamųjų procesų kreivės, kai veikia valdymo sistema ir yra imituojamas siurblio gedimas nuo 9 val. iki 9,5 val., pamaitinimo substrato srautas staiga sumažėja 75 %.



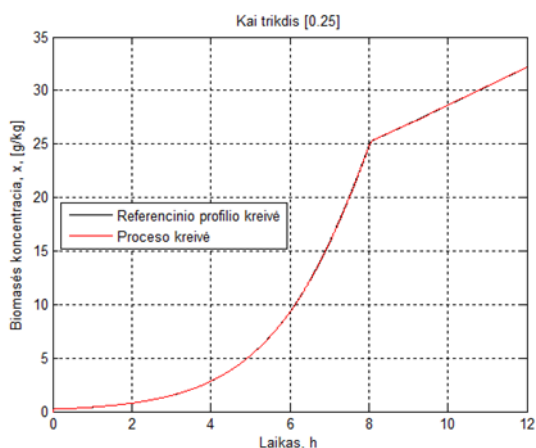
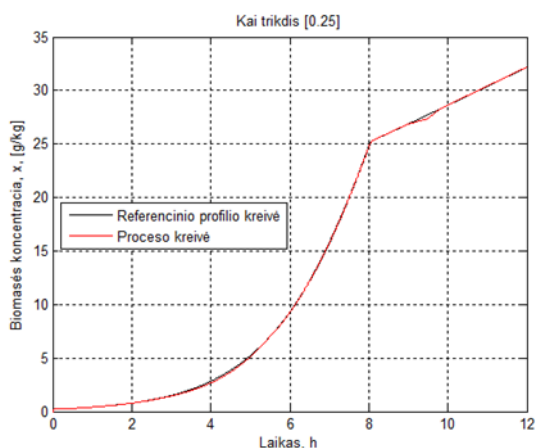
3.25 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų substrato pamaitinimo greičio, μ grafikai.



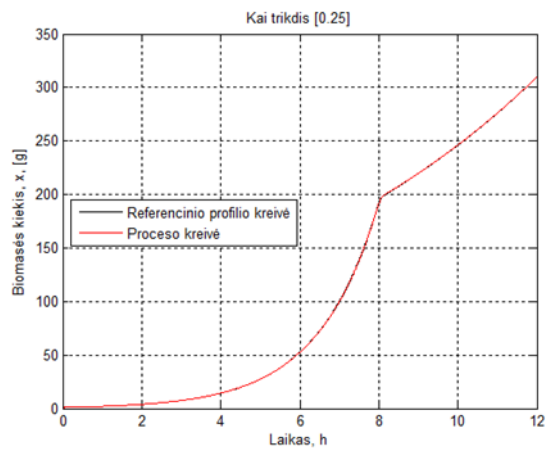
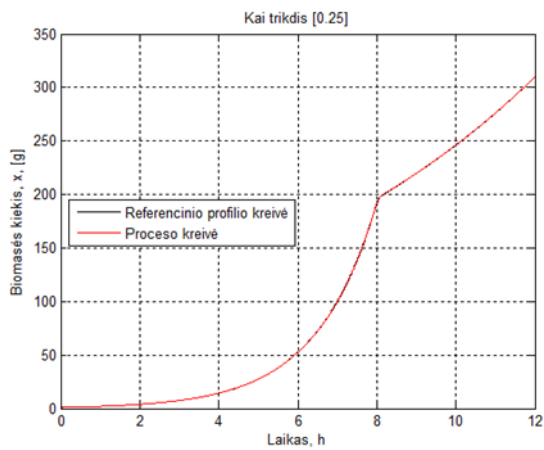
3.26 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų deguonies sunaudojimo greičio, tOUR grafikai.



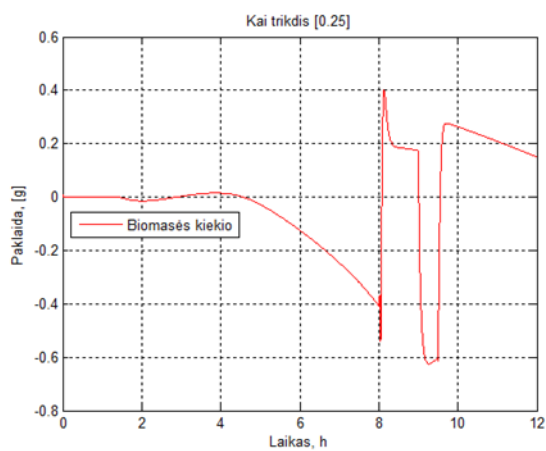
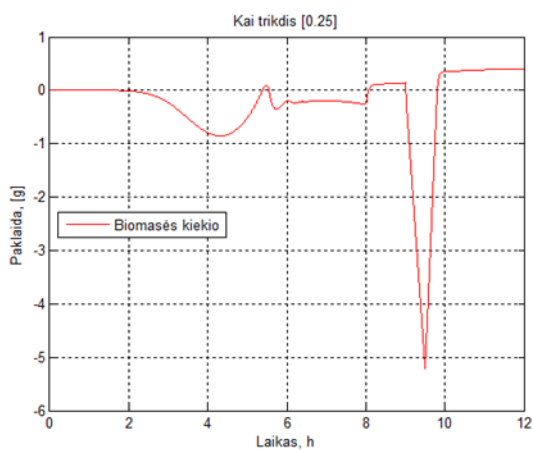
3.27 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų integralinio deguonies sunaudojimo greičio, tcOUR grafikai.



3.28 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės koncentracijos, x grafikai



3.29 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



3.30 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.1.6 Rezultatų dalis, trikdys – pamaitinimo substrato staigus sumažėjimas

Pateiktuose grafikuose (**3.1-3.30 pav.**) matoma, kad tiek pirmoji, tiek antroji reguliavimo sistema tinkamai seka užduotuosius profilius. Vis dėlto veikiant sistemas skirtingo dydžio trikdžiams, sistemų darbas išsiskiria. Veikiant trikdžiui, kai pamaitinimo substrato srauto, laiko momentu nuo 6 val. iki 7 val., sumažinamas 50 %, abi reguliavimo sistemos dar tinkamai reaguoja į trikdantįjį poveikį. Tačiau padidinus substrato pamaitinimo srauto trikdį, tai yra sumažinus pamaitinimo srautą iki 75 %, pirmoji reguliavimo sistema veikia ne taip sėkmingai, kaip antroji. **Lentelėje 3.1 ir 3.2**, pateikiamos reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos skirtingais laiko momentais. Naudojant pirmąją reguliavimo sistemą, atsiranda didesnės biomasės kiekio paklaidos, kai sistemą veikia trikdžiai, todėl biomasės profilio sekimui būtų tikslinga naudoti antrąją reguliavimo sistemą.

3.1 lentelė Biomasės kiekio paklaidos naudojant primą reguliavimo sistemą

Trikdys, pamaitinimo substratas sumažėja	Paklaida, pasibaigus procesui	Paklaida, proceso 8 val.	Max paklaida	Max paklaidos, laikas
Be trikdžio	0,1946	-0,2676	-0,853	4,324
6 val. iki 7 val., iki 50%	0,3172	-0,138	-1,0178	6,217
6 val. iki 7 val., iki 75%	-2,511	-19,025	23,5145	8,5715
9 val. iki 9,5 val., iki 75% Nuo 9	0,404	-0,2676	-5,2105	9,504
9 val. iki 9,5 val., 50% Nuo 9	0,2188	-0,2676	-0,853	4,324

3.2 lentelė Biomasės kiekio paklaidos naudojant antrą reguliavimo sistemą.

Trikdys, pamaitinimo substratas sumažėja	Paklaida, pasibaigus procesui	Paklaida, proceso 8 val.	Max paklaida	Max paklaidos, laikas
Be trikdžio	0,0834	-0,4095	-0,5401	8,0436
6 val. iki 7 val., iki 50%	0,1681	0,244	-0,5401	8,0436
6 val. iki 7 val., iki 75%	0,3352	0,1372	-0,9592	7,0002
9 val. iki 9,5 val., iki 75% Nuo 9	0,1504	-0,4095	-0,6257	9,2759
9 val. iki 9,5 val., 50% Nuo 9	0,0943	-0,4095	-0,5401	8,0436

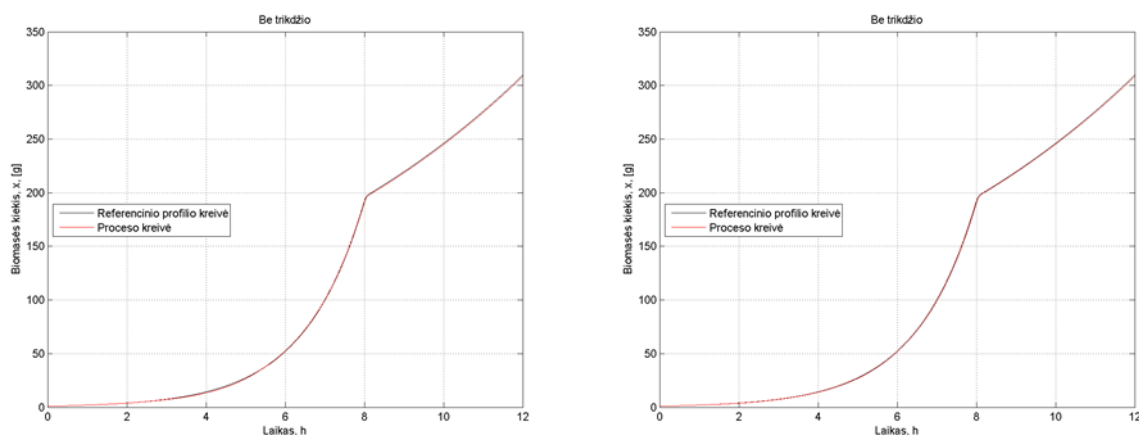
3.2 Tyrimo rezultatų palyginimas, kai trikdis – aptriukšmintas, *OUR* - deguonies sunaudojimo greičio, matavimas

Imituojamas trikdis – aptriukšmintas *OUR*, deguonies sunaudojimo greičio, matavimas. Signalui aptriukšminti naudojamas tolydusis skirstinys [0 1] intervale. Triukšmo intensyvumui naudojamas: 2 % bei 10 % dydžio standartinis nuokrypis, skaičiuojamas nuo momentinės naudingojo signalo amplitudės. Pirmosios sistemos (2.11 pav.) bei antrosios sistemos (2.12 pav.) palyginamos skirtinguose eksperimentuose:

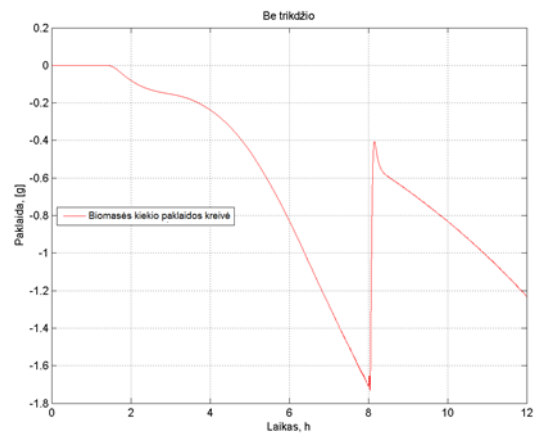
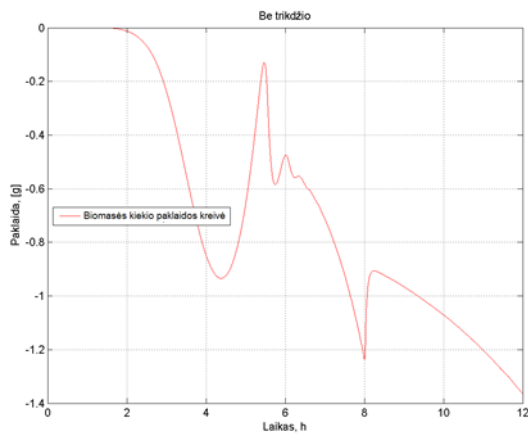
- kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, bei *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 2 %
- kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, bei *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 10 %
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. Iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 75 %, bei *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 2 %
- kai valdymo sistema veikia, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. Iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 75 %, bei *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 10 %

Tyrimo naudojamas (2.2 pav.) - grafike atvaizduotas bioproceso substrato pamaitinimo greitis. Imitaciniame modelyje skaičiavimo laikas naudojamas 12 val. Gauti rezultatai atvaizduojami pirmosios ir antrosios modeliujamų sistemų grafikuose (3.31-3.38 pav.) : biomasės kiekio, bei biomasės kiekio paklaidos.

3.2.1 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 2 %



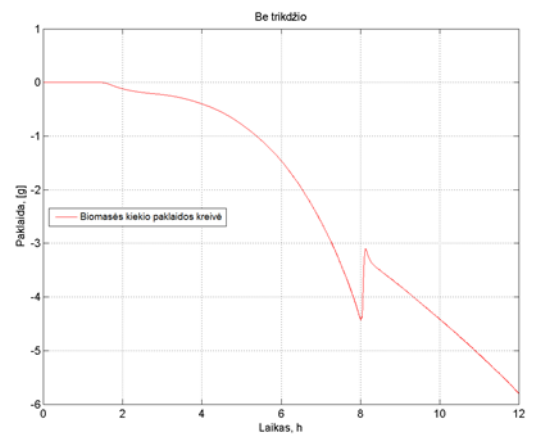
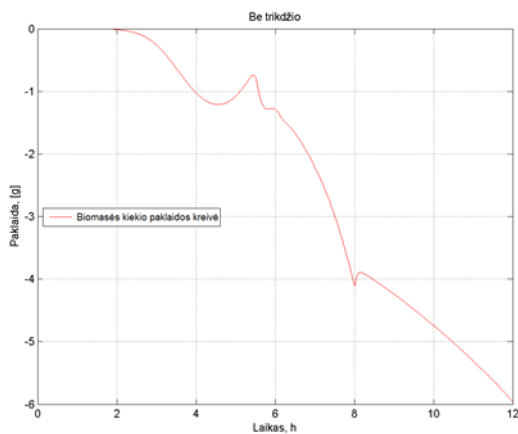
3.31 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



3.32 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

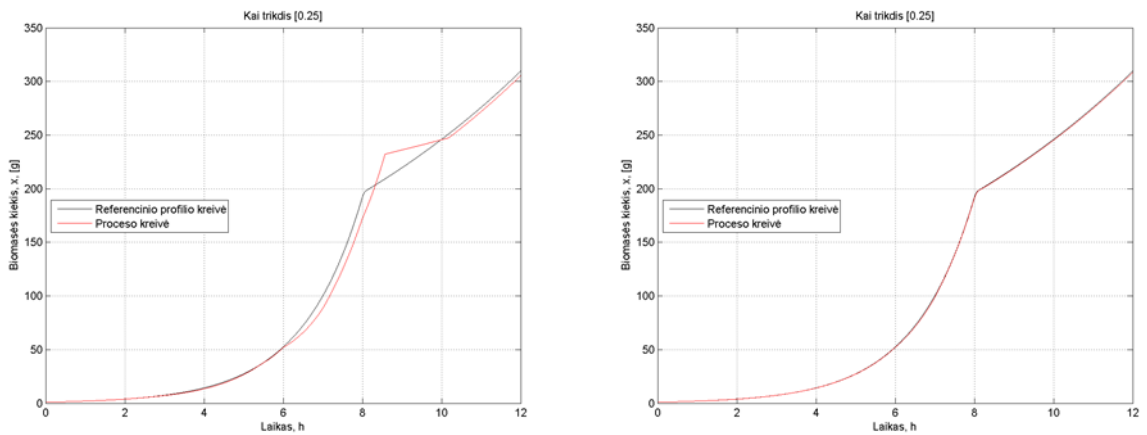
3.2.2 Reguliavimo sistemų darbas, kai valdymo sistema veikia be išorinių valdymo trikdžių, *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 10 %

3.33 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai

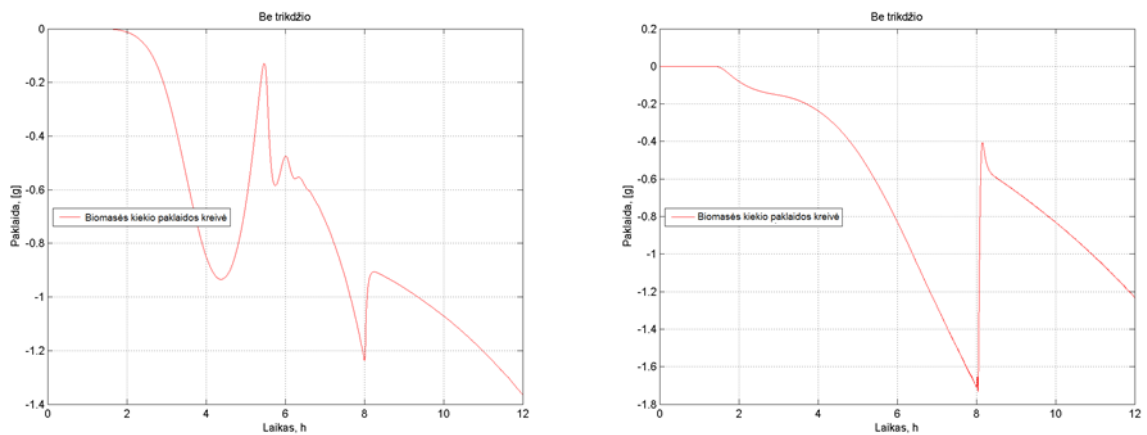


3.34 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.2.3 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %, *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 2 %

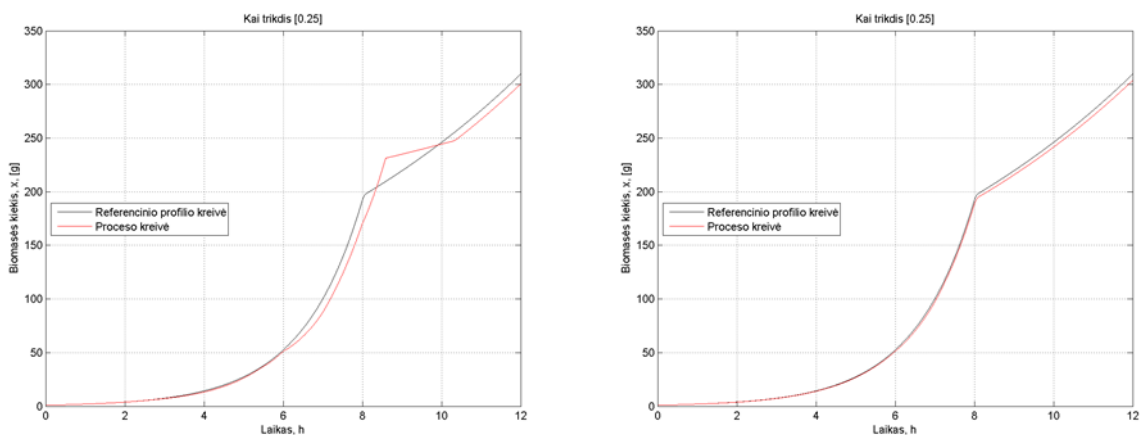


3.35 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai

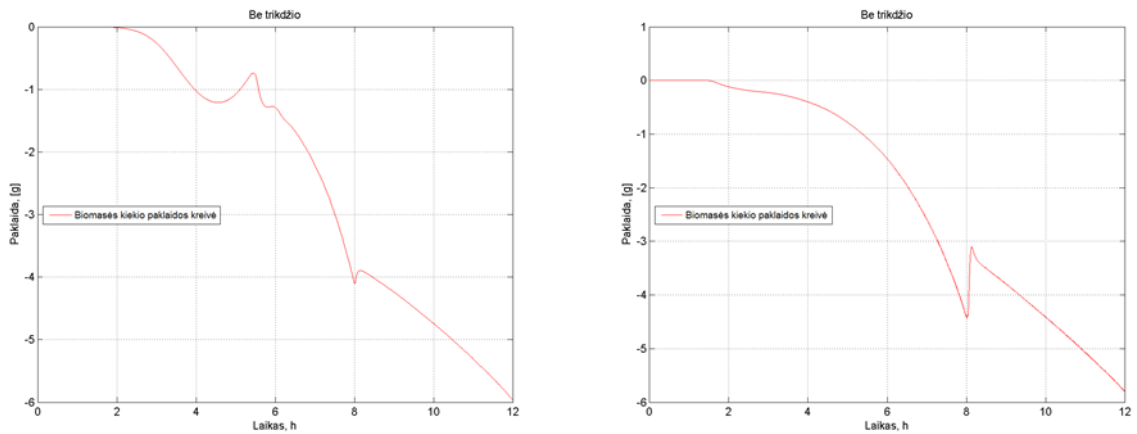


3.36 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.2.4 Reguliavimo sistemų darbas, imituojant siurblio gedimą nuo 6 val. iki 7 val., pamaitinimo substrato srautas sumažėja 50 %, *OUR* signalas aptriukšmintas ~ 10 %



3.37 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio, X grafikai



3.38 pav. Pirmos bei antros reguliavimo sistemų biomasės kiekio paklaidos grafikai

3.2.5 Rezultatų dalis, kai trikdis – aptriukšmintas, *OUR* - deguonies sunaudojimo greičio, matavimas

Pateiktuose grafikuose (3.1-3.30 pav.) matoma, kad tiek pirmoji, tiek antroji reguliavimo sistema tikslingai seka užduotąjį biomasės profilį. Veikiant *OUR* matavimo aptriukšminimui, taip pat sistemas veikiant trikdžiui, kai substrato pamaitinimo srautas staiga sumažėja iki 75 %, tarp 6 val. ir 7 val., sekimų sistemų paklaidos pradeda nesutapti, skirtingais laiko momentais. Naudojant pirmąją reguliavimo sistemą, atsiranda didesnės biomasės kiekio paklaidos, aptriukšminus *OUR* matavimo signalą.

4 Išvados ir rezultatai

1. Literatūros dalyje apžvelgti biotechnologiniai procesai, veiksniai, darantys įtaką biomasės augimui, taip pat matematinis modelis bei valdymo sistemos.
2. Pasirinkto biotechnologinio proceso matematinis modelis realizuotas Matlab/simulink aplinkoje.
3. Pritaikius realizuotą biotechnologinio proceso matematinį modelį, buvo tiriamos dvi reguliavimo sistemos. Darbe palygintos dvi biomasės profilio sekimo sistemos: pirmoji - pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje bei antroji - pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su santykinio greičio įverčio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje.
4. Biomasės profilio sekimo sistemų Matlab/Simulink aplinkoje pagalba iširtos biotechnologinio proceso reakcijos į skirtingus pamaitinimo profilio trikdžius.
5. Abiejų nagrinėtų sistemų užduotojo profilio sekimo kokybė tenkina biotechnologinio proceso darbo kriterijus.
6. Naudojant pirmąją reguliavimo sistemą atsiranda didesnės biomasės kiekio paklaidos, kai sistemą veikia trikdžiai, todėl biomasės profilio sekimui būtų tikslinga naudoti antrąją reguliavimo sistemą.

5 Literatūros šaltiniai

1. **D. Levišauskas, V. Galvanauskas, S. Hendrich, K. Wilhelm, N. Volk, A. Lubbert.** Model-based optimization of viral capsid protein production in fed-batch culture of recombinant *Escherichia coli*. *Bioprocess Biosyst Eng* 25 (2003) 255–262;
2. **A. Kuprijanov, S. Schaepe, M. Aehle, R. Simutis, A. Lubbert**
Improving cultivation processes for recombinant protein production. *Bioprocess Biosyst Eng* (2012) 35:333–340;
3. **Vytautas Galvanauskas, Rimvydas Simutis, Donatas Levišauskas, Jolanta Repšytė.** Inferential Control System for Tracking Desired Trajectory of Biomass Growth in Fed-batch Cultivation proces. *Mokslinis straipsnis*;
4. **Astrom K, Hagglund T**
Advanced PID control. ISA Instrumentation, Systems and Automation Society, Research (2006);
5. **Luedeking, R., Piret, E.L.**, Transient and steady state continuous fermentation. Theory and experiments, *J. Biochem. Microbiol. Technol. Eng.*, No.1, 1959, pp. 393-412;
6. **Luedeking, R., Piret, E.L.** A kinetic study of the lactic acid fermentation. Batch process at controlled pH. *J. Biochem. Microbiol. Technol. Eng.* 1959, No 1, 393-412;
7. **Vytautas Galvanauskas, Donatas Levišauskas.** Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas. Vilniaus Pedagoginio Universiteto leidykla, 2008m.;
8. **M. Jenzsch, R. Simutis, G. Eisbrenner, I. Stuckrath, A. Lubbert.** Estimation of biomass concentrations in fermentation processes for recombinant protein production. *Mokslinis straipsnis*;
9. **Vytautas Galvanauskas, Donatas Levišauskas.** Biotechnologinių procesų modeliavimas, optimizavimas ir valdymas. Praktikumai ir uždaviniai. Vilniaus Pedagoginio Universiteto leidykla, 2008m.;
10. **Donatas Levišauskas.** Automatinio reguliavimo sistemų derinimas Vilniaus Pedagoginio Universiteto leidykla, 2008m.;
11. **Vytautas Aleksa, Vytautas Galvanauskas.** Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas. KTU leidykla "Technologija", 2008m.;
12. **Kęstutis Jonelis.** Control algorithms and systems of biotechnological wastewater treatment processes. Daktaro disertacija.;

6 Priedai

6.1 Priedas Nr. 1 Matematinio modelio „Matlab“ programos tekstas

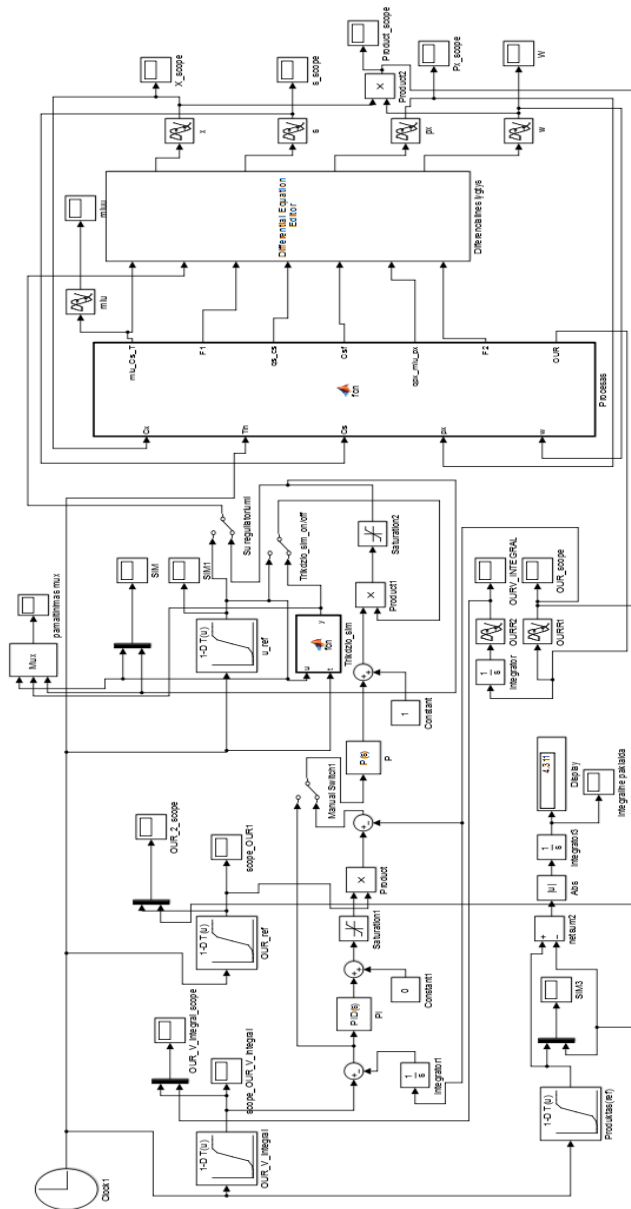
```
function [miu_Cs_T, F1, qs_cs, Csf,qpx_miu_px, F2, OUR] = fcn (Cx,Tin,Cs,px, w)
% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language. % See the help menu for details.
Ki=93.8; %inhibition constant for substrate consumption
Kimi=0.0174; %inhibition constant in protein model
Km=751; %proportionality coefficient in protein model
Kmiu=0.61; %monod constant in protein model
Ks=0.0333; %monod constant for substrate consumption
Kt=0.0495; %temperature constant
m=0.0242; %biomass maintenance term
Csf=151.0; %substrate concentration in feeding solution
Tpx=1.495; %corresponding time constant
Yxs=0.46; %biomass/substrate yield
miumax=0.737; %maximal specific biomass growth rate
Tref=37;
if (Tin) < 8.0
    alfa=0.5;
    beta=0.15;
    T=37;
    Yox=0.5;
    mox=0.15;
else
    alfa=0.75;
    beta=0.015;
    T=32;
    Yox=0.75;
    mox=0.015;
end
miu_Cs_T=miumax*(Cs/(Ks+Cs))*(Ki/(Ki+Cs))*exp(Kt*(T-Tref));
qs_cs=(miu_Cs_T/Yxs)+m;
pmax=(Km*miu_Cs_T)/(Kmiu+miu_Cs_T+((miu_Cs_T^2)/Kimi));
F1=0.0008*miu_Cs_T*Cx*w;
F2=-0.025;
if (Tin) < 8.0
    qpx_miu_px = 0;
else
    qpx_miu_px=(1/Tpx)*(pmax-px);
end
OUR_1=Yox*miu_Cs_T*Cx+mox*Cx;
OUR=OUR_1*w;
```

6.2 Priedas Nr. 2 Estimatorius modelio „Matlab/simulink“ programos tekstas

```
function [mu_est, X_est] = fcn (mu_est_n1,OUR_n, V_n1, F_n1,t,X_est_n1)
% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.
% See the help menu for details.
dt=1/1200;
tind=8;
if t<=tind
    alpha=0.5;
    beta=0.15;
else
    alpha=0.75;
    beta=0.015;
end

X_est=X_est_n1;
mu_est=(OUR_n-(beta*X_est_n1*V_n1))/(alpha*X_est_n1*V_n1);
X_est=X_est_n1+dt*((mu_est-(F_n1/V_n1))*X_est_n1);
mu_est=(OUR_n-(beta*X_est*V_n1))/(alpha*X_est*V_n1);
```

6.3 Priedas Nr. 3 pakopinės biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje „Matlab/simulink“ schema



6.4 Priedas Nr. 4 Pakopinė biomasės kiekio sekimo sistema su deguonies sunaudojimo greičio signalu stabilizuojančio kontūro grįžtamajame ryšyje „Matlab/simulink“ schema

