



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Neurovaldikliu pagrįstos sistemos ištirpusio deguonies  
koncentracijai bioreaktoriuje valdyti sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Laimonas Jakaitis**

Projekto autorius

**Prof. dr. Vytautas Galvanauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Neurovaldikliu pagrįstos sistemos ištirpusio deguonies koncentracijai bioreaktoriuje valdyti sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Laimonas Jakaitis**

Projekto autorius

**Prof. dr. Vytautas Galvanauskas**

Vadovas

**Prof. dr. Renaldas Urniežius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laimonas Jakaitis

## **Neurovaldikliu pagrįstos sistemos ištirpusio deguonies koncentracijai bioreaktoriuje valdyti sukūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Laimonas Jakaitis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Jakaitis Laimonas. Neurovaldikliu pagrįstos sistemos ištirpusio deguonies koncentracijai bioreaktoriuje valdyti sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: ištirpusio deguonies koncentracija, valdymo sistema, MFA valdymas, PI reguliatorius, biotechnologija, bioreaktorius, imitacinis moduliavimas.

Kaunas, 2022. 47 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe apžvelgiami biotechnologiniai procesai, bioreaktoriai, valdymo sistemos procesams valdyti, matuojami parametrai ir matavimo būdai. Tyrimui pasirinktas biotechnologinis procesas su pamaitinimu *e. Coli* rekombinuotų bakterijų baltymų gamybai. Proceso modelis papildytas ištirpusio deguonies koncentraciją bioreaktoriuje apibrėžiančiomis diferencialinėmis lygtimis. Matematiniumi modeliu aprašyti procesai naudojami ištirpusio deguonies koncentracijai bioreaktoriuje valdyti kuriamoje valdymo sistemoje.

Sukurta valdymo sistema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti pasitelkiant neurovaldikliu pagrįstą, adaptyvų MFA valdymą, nenaudojant modelio. Matlab programinėje įrangoje realizuota uždarojo grįžtamojo ryšio valdymo sistema su MFA valdymu ir atliktas sistemos veikimo imitacinis modeliavimas. Atlikti ištirpusio deguonies koncentracijai reguliuoti sukurtos valdymo sistemos tyrimai tokiomis sąlygomis: esant pastoviai užduotai ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertei; keičiantis ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertei; sistemoje atsiradus trikdančiam poveikiui.

Adaptyvaus, neurovaldikliu pagrįsto valdymo, nenaudojant modelio, ištirpusio deguonies koncentracijai reguliuoti atliktų tyrimų rezultatai ir laikinės charakteristikos palygintos valdymo sistemoje su PI pastovių parametru reguliatoriumi realizuotu Matlab/Simulink programinėje įrangoje.

Jakaitis Laimonas. Development and Investigation of Neurocontroller-based System for Dissolved Oxygen Control in Bioreactor. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electronics engineering, engineering science.

Keywords: dissolved oxygen concentration, control system, Model-Free Adaptive control, PI controller, biotechnology, bioreactor, simulation.

Kaunas, 2022. 47 pages.

### **Summary**

Biotechnological processes, bioreactors, control systems, measured parameters and measurement methods are reviewed in this work. A fed-batch cultivation biotechnological process to produce recombinant e. Coli bacteria has been selected for the study. Process model is supplemented by a state model for the analysis of dissolved oxygen concentration. Mathematical models are used for the development of control system to control the dissolved oxygen concentration

A control system has been developed to control dissolved oxygen concentration using an adaptive Model-Free Adaptive (MFA) neurocontroller-based control. A closed-loop feedback control system with a Model-Free Adaptive controller is implemented in Matlab software and simulates system operation. Studies of the MFA controller developed to regulate the dissolved oxygen concentration were performed under the following conditions: at a constant set value of the dissolved oxygen concentration set point value; by varying the value of the dissolved oxygen concentration set point; in the event of a disruptive effect on the system.

The results and time characteristics of the Model-Free Adaptive control were compared with the PI constant parameter control implemented in Matlab / Simulink software.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Apžvalginė dalis .....</b>	<b>12</b>
1.1. Įvadas į biotechnologijas .....	12
1.2. Pramoninė biotechnologija .....	12
1.2.1. Biotechnologiniai procesai bioreaktoriuje.....	12
1.2.2. Biotechnologinio proceso parametrų matavimas .....	13
1.2.3. Matuojami parametrai biotechnologiniame procese .....	14
1.3. Biotechnologinių procesų bioreaktoriuje valdymas .....	15
1.3.1. Valdymo sistemos .....	15
1.3.2. Valdymo metodai .....	17
1.3.3. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas .....	19
<b>2. Metodinė dalis.....</b>	<b>22</b>
2.1. Biotechnologinis procesas ir jo modelis.....	22
2.2. Sistemos valdymas .....	24
2.2.1. MFA valdymo sistema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti.....	25
2.3. Biotechnologinio modelio realizavimas Matlab ir Matlab/Simulink programinėje įrangoje... 27	
2.3.1. Biotechnologinio proceso su PI tipo valdymu realizavimas Matlab/Simulink programinėje įrangoje.....	28
2.3.2. Biotechnologinio proceso su MFA adaptyviu valdymu ištirpusio deguonies koncentracijai reguliuoti realizavimas Matlab programinėje aplinkoje.....	30
<b>3. Tyrimo rezultatų dalis.....</b>	<b>31</b>
3.1. Biotechnologinio proceso imitacinis modeliavimas.....	31
3.2. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos imitacinis modeliavimas .....	33
3.2.1. Ištirpusio deguonies koncentracijos nustatytos vertės palaikymo reguliavimas MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio.....	33
3.2.2. Nustatytos pastovios vertės valdymo MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio, ir PI reguliatoriumi palyginimas.....	35
3.2.3. Valdymo sistemos reakcija į nuostato pokyčius.....	38
3.2.4. Valdymo sistemos reakcija į trikdį.....	41
<b>Išvados .....</b>	<b>45</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>46</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>48</b>
1 priedas. Pagrindinės „MFA_Simulation“ Matlab programos kodas .....	48
2 priedas. Funkcijos „MFA_procesas“ Matlab programos kodas .....	51
3 priedas. Matlab/Simulink programos funkcijos .....	52
4 priedas. Matlab/Simulink programos vaizdas su PI reguliatoriaus valdymo sistema .....	53

## Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Bioproceso modelio parametrai .....	23
2.2 lentelė. Ištirpusio deguonies modelio parametrai .....	24
3.2.1.1 lentelė. MFA valdymo derinimo parametrų vertės.....	33
3.2.2.1 lentelė. PI regulatoriaus ir MFA valdymo sistemų vidutinės absoliutinės paklaidos esant pastoviam ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatui DOCset = 10% .....	36
3.2.3.1 lentelė. Ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertės laiko intervalais .....	38
3.2.3.1 lentelė. PI regulatoriaus ir MFA valdymo sistemų vidutinės absoliutinės paklaidos esant pastoviam ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatui DOCset = 10% .....	40
3.2.4.1 lentelė. Vidutinės absoliutinės paklaidos trikdžio poveikiui šalinti ištirpusio deguonies valdymo sistemos PI ir MFA valdymo palyginimas .....	43

## Paveikslų sąrašas

1.1.1.1 pav. Maišymo reaktorius (kairėje) ir maišymo su pamaitinimu reaktorius (viduryje), nenutrūkstamo proceso (kairėje) [7].....	13
1.1.1.2 pav. Nepertraukiamo maišomo rezervuaro tipo bioreaktoriaus bendroji struktūra [10] .....	13
1.3.1.1 pav. a) Atviro ryšio valdymo sistema, b) Trikdžio valdymo sistema c) Grįžtamojo ryšio valdymo sistema .....	16
1.3.3.1 pav. Adaptyvios ištirpusio deguonies valdymo sistemos .....	20
1.3.3.2 pav. Adaptyvios stiprinimo numatymo valdymo sistemos schema.....	21
2.2.1 pav. Valdymo schema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti.....	25
2.2.1.1 pav. MFA valdymo struktūra [22].....	26
2.3.1 pav. Pamaitinimo profilio F1 grafikas.....	27
2.3.2 pav. Biomasės augimo greičio $\mu$ grafikas.....	28
2.3.3 pav. Deguonies suvartojimo greičio OUR grafikas.....	28
2.3.1.1 pav. Biotechnologinio proceso ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo Matlab/Simulink modelis su PI tipo pastovių parametrų valdymu .....	29
2.3.1.2 pav. Biotechnologinio proceso modelio (1) – (3) diferencialinių lygčių realizavimas „Modelis 1“ DEE bloke (kairėje) ir (7) – (12) diferencialinių lygčių realizavimas „Modelis 2“ DEE bloke... 30	30
3.1.2 pav. Biotechnologinio proceso grafikai. Qair – aeravimo srautas, N – maišyklės sūkliai, cdO – ištirpusi deguonies koncentracija absoliutiniais vienetais, yo2 - Išmetimo dujų deguonies dalis, cel – ištirpusio deguonies koncentracija iš matavimo elektrodo signalo. ....	32
3.2.1.1 pav. Biotechnologinio proceso grafikai su MFA valdymu. Qair – aeravimo srautas, N – maišyklės sūkliai, cdo – ištirpusi deguonies koncentracija absoliutiniais vienetais, yo2 - Išmetimo dujų deguonies dalis, cel – ištirpusio deguonies koncentracija iš matavimo elektrodo signalo.....	34
3.2.1.2 pav. Paklaidos tarp 10% užduotos ištirpusio deguonies koncentracijos vertės ir ištirpusio deguonies elektrodo signalo cel grafikas.....	35
3.2.2.1 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos grafikas, kai nuostato vertė pastovi, DOCset=10% .....	36
3.2.2.2 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas, kai nuostato vertė pastovi, DOCset=10% .....	37
3.2.2.3 pav. Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI regulatoriaus valdymo sistemoms esant trikdžio poveikiui – aeravimo srauto pokyčiams .....	38
3.2.3.1 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas vykstant nuostato vertės DOCset pokyčiams.....	39
3.2.3.2 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo reakcijos į DOCset pokyčio šuolinią padidėjimą .....	39
3.2.3.3 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas vykstant nuostato vertės DOCset pokyčiams.....	40
3.2.3.4 pav. Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI regulatoriaus valdymo sistemoms esant ištirpusio deguonies nuostato vertės pasikeitimams.....	41
3.2.4.1 pav. Sistemos trikdžio poveikio – aeravimo srauto kitimo grafikas .....	42
3.2.4.2 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos grafikas, esant trikdžio poveikiui - aeravimo srauto pokyčiams.....	43
3.2.4.3 pav. Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas esant trikdžiui – aeravimo srauto pakitimams .....	43



3.2.4.4 pav. Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI reguliatoriaus valdymo sistemoms esant trikdžio poveikiui – aeravimo srauto pokyčiams .....	44
---	----

## Santrumpų sąrašas

### Santrumpos:

pH – rodiklis nusakantis tirpalo rūgštingumą arba šarmingumą;

DO – Ištirpusios deguonies koncentracija (*angl. Dissolved Oxygen*);

Pt – Platina;

Au – Auksas;

SISO – valdymo sistemos modelis, kuris turi vieną įėjimą ir vieną išėjimą (*angl. Single Input and Single Output*);

MIMO – valdymo sistemos modelis, kuris turi daugiau nei vieną įėjimą ir išėjimą (*angl. Multiple Inputs and Multiple Outputs*);

PID – proporcinis integralinis išvestinis (PID) valdymas, kurį sudaro trys grandys: proporcinė (P), integruojančioji (I), diferencijuojančioji (D);

NN – Neuroniniai tinklai (*angl. Neural network*);

MPC – Modelio numatomasis valdymas (*angl. Model predictive control*);

MFA – adaptyvus valdymas, nenaudojant modelio (*angl. Model-Free Adaptive*);

PI – Proporcinis integralinis valdymas, kurį sudaro dvi grandys: proporcinė (P), integruojančioji (I);

DOC – Ištirpusio deguonies koncentracija (*angl. Dissolved Oxygen Concentration*);

DDE – diferencialinių lygčių redaktorius Matlab/Simulink programinėje įrangoje;

OUR – deguonies suvartojimo greitis (*angl. Oxygen Uptake Rate*)

MAE – vidutinė absoliutinė paklaida (*angl. Mean Absolute Error*)

## Įvadas

Biotechnologija yra svarbi žmonijos raidos dalis. Biotechnologiniai laimėjimai ir atradimai ženkliai prisideda prie žmonijos raidos ir gyvenimo kokybės gerinimo. Biotechnologija apima daug įvairių sričių, tokių kaip maisto pramonė, medicina, atliekų perdirbimas ir kitos. Pramoninėje biotechnologijoje svarbią dalį užima mikroorganizmai ir procesai susiję su jais. Mikroorganizmų augimui ir gyvavimui bioreaktoriuje svarbus yra deguonis, kurį pasisavina ištirpusį skystoje terpėje. Deguonies tirpumas yra pakankamai mažas, todėl svarbu išlaikyti pakankamą ištirpusio deguonies kiekį mikroorganizmų gyvavimui. Dėl to yra aktualus ištirpusio deguonies valdymas. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas yra sudėtingas uždavinys valdymo sistemai. Ieškoma patogių, efektyvių ir aktualių valdymo sistemų sprendimų. Vystomi ir tiriami adaptyvaus valdymo algoritmai, neuroniniai tinklai ir kiti valdymo sprendimai biotechnologiniuose procesuose.

Darbe atliekamas ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo tyrimas periodinio su pamaitinimo e. Coli bakterijų rekombinuotų baltymų sintezės procese. Valdymui pasitelkiamas adaptyvus, neurovaldikliu pagrįstas valdymas, nenaudojant modelio, ir atliekamas šios sistemos tyrimas.

**Projekto tikslas:** sukurti valdymo algoritmą, pagrįstą adaptyviuoju valdymu naudojant MFA neurovaldiklį skirtą ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti bioreaktoriuje, ir imitacinio modeliavimo būdu atlikti tokios sistemos tyrimą, siekiant nustatyti reguliavimo kokybę palaikant pastovią ištirpusio deguonies koncentraciją, sistemos reakciją keičiant nuostatą ir sistemos reakciją į trikdį.

### Projekto uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą. Išanalizuoti biotechnologinius procesus, bioreaktorius ir jų tipus, matuojamus parametrus ir valdymo sistemas.
2. Matematinio modeliu aprašyti biotechnologinį procesą ištirpusios deguonies koncentracijai valdyti.
3. Realizuoti neurovaldikliu pagrįstą, adaptyvų valdymą ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti imitacinio modeliavimo programinėje įrangoje.
4. Atlikti sukurtos sistemos tyrimą nustatytos pastovios ir kintančios ištirpusio deguonies koncentracijos vertės valdymui ir reakcijai į trikdžio poveikį.
5. Palyginti sukurtą neurovaldiklių pagrįstą, adaptyvų valdymą su PI reguliatoriumi.
6. Išanalizuoti tyrimo rezultatus ir pateikti išvadas apie ištirpusio deguonies koncentracijos valdymą naudojant neurovaldikliu pagrįstą, adaptyvų valdymą.

## **1. Apžvalginė dalis**

### **1.1. Įvadas į biotechnologijas**

Biotechnologija yra biologinių sistemų, randamų organizmuose, arba pačių gyvųjų organizmų panaudojimas, siekiant technologinės pažangos ir pritaikant tas technologijas įvairiose srityse, pradedant žemės ūkio praktika ir baigiant medicinos sektoriumi. Biotechnologiniai procesai yra svarbi maisto, chemijos ir farmacijos pramonės dalis, kai produktų gamybai naudojami mikrobu, žinduolių ir augalų ląstelės ir ląstelių komponentai. Biotechnologiniai procesai įprastai yra netiesiniai ir nestacionarūs, todėl jų valdymas yra sudėtingas uždavinys, ypač vykstant pramoniniuose rekombinuotų baltymų gamybos procesuose, kai turi būti užtikrinti aukšti saugos reikalavimai ir eksploatavimo apribojimai [1].

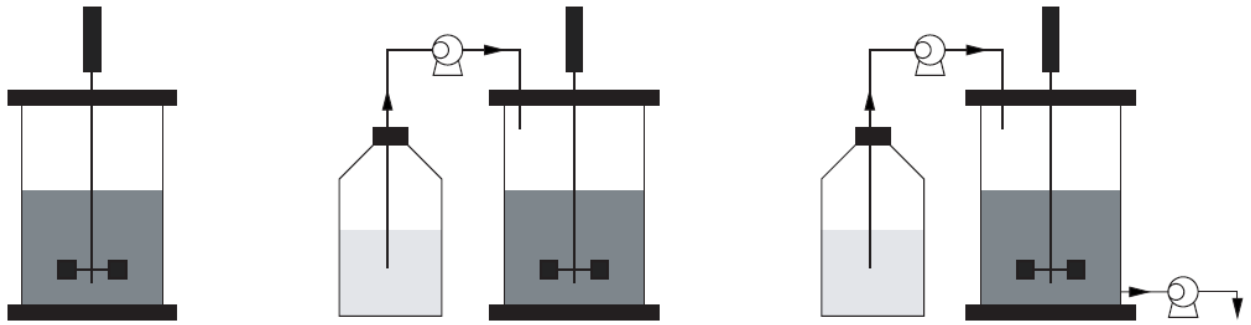
### **1.2. Pramoninė biotechnologija**

Pramoninė biotechnologija – tai biotechnologijos pritaikymas pramonėje. Pramoninėje biotechnologijoje naudojamos ląstelės, mikroorganizmai, arba ląstelių komponentai (fermentai), kad būtų galima gaminti naudingus produktus: chemikalus, maistą, pašarus, ploviklius, popierių ir plaušieną, tekstilę bei biokurą [2].

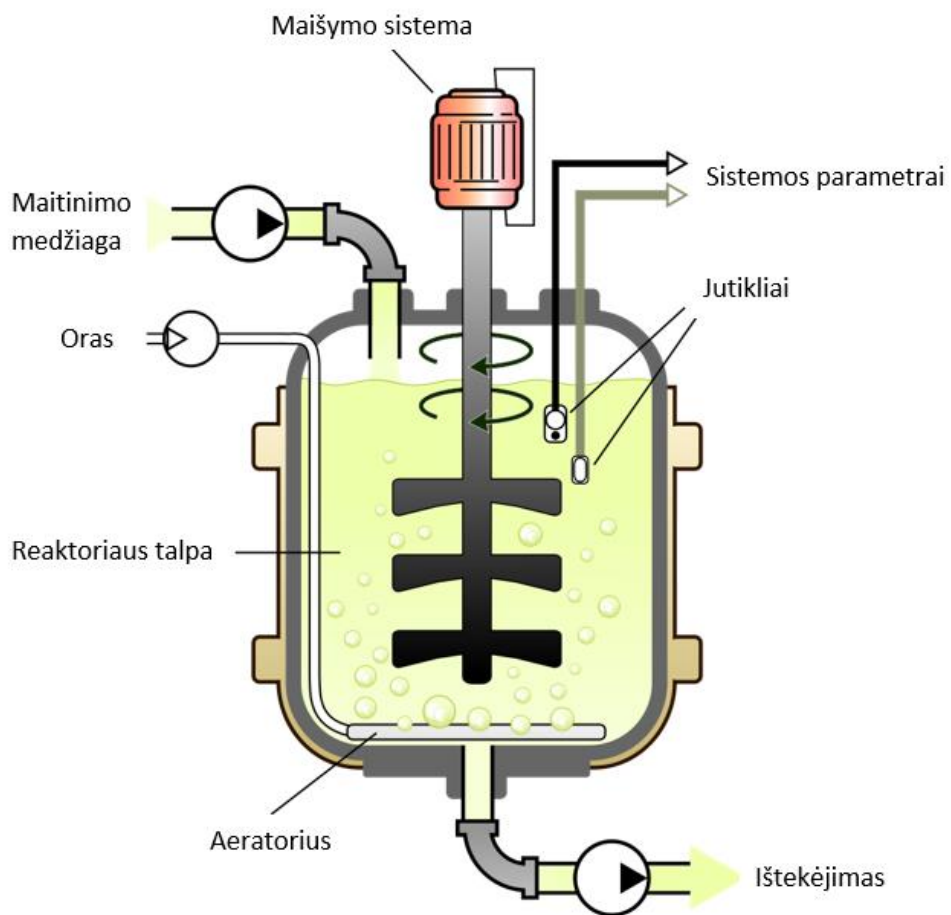
Pramoninės biotechnologijos pradžia laikoma apie 6000 metų prieš mūsų erą, kai vyno gamybai fermentuodavo vynuoges, o naudojant mikrobines mieles buvo gaminamas alus. Laikui bėgant ir žmonijai tobulėjant plėtėsi žinios ir apie biotechnologijas, fermentaciją. Pritaikant biotechnologines žinias gaminti actas, sūris, jogurtas ir kiti maisto produktai. Taip pat, buvo svarbių atradimų susijusių medicinos srityje. 1929 m. Seras Aleksandras Flemingas iš pelėsio išgavo peniciliną, kuris vėliau sukūrus fermentacijos metodus, gamintas pramonėje. Sparti modernios pramoninės biotechnologinės raida įvyko po Antrojo pasaulinio karo. Pradėti gaminti fermentai naudojami kasdieniame gyvenime ir gamybos sektoriuje, apimant kaip pavyzdį tokius fermentus kaip mėsos minkštiklis ar kontaktinių lęšių skystyje pašalinti lipnias baltymų sankaupas naudojamus fermentus. Pramoninė biotechnologija apima fermentų gamybą iš mikroorganizmų [11].

#### **1.2.1. Biotechnologiniai procesai bioreaktoriuje**

Pramonėje biotechnologiniams procesams, apimantiems organizmų augimą, fermentaciją, dažnai naudojami bioreaktoriai. Biorektorius yra talpa arba indas, skirtas palaikyti ir vykdyti sąlygas dalyvaujant mikroorganizmams žaliavas paverčiant produktais. Taip pat, biorektorius gali reikšti prietaisą ar sistemą, skirtą ląstelėms ar audiniams auginti ląstelių masėje. Bioreaktoriai pagal veikimo tipą gali būti kelių tipų: maišymo, maišymo su pamaitinimu arba nenutrūkstamo proceso (Pav. Nr. 1.2.1.1 ir Pav. Nr. 1.2.1.2) [7].



**1.1.1.1 pav.** Maišymo reaktorius (kairėje) ir maišymo su pamaitinimu reaktorius (viduryje), nenutrūkstamo proceso (kairėje) [7]



**1.1.1.2 pav.** Nepertraukiamo maišomo rezervuaro tipo bioreaktoriaus bendroji struktūra [10]

## 1.2.2. Biotechnologinio proceso parametrų matavimas

Norint pasiekti ląstelių biologinį potencialą, bioreaktoriuje turi būti palaikomos optimalios aplinkos sąlygos ląstelėms auginti, produktui formuoti. Biologinėms sistemoms įtaką gali daryti skirtingi proceso kintamieji. Todėl svarbu matuoti, sekti bei stebėti vykstančius veiksmus bei parametrus. Biotechnologiniai parametrai gali būti įvertinami tiesiogiai ir netiesiogiai. Tiesiogiai įvertinami parametrai yra jutikliais išmatuojami dydžiai. Netiesiogiai parametrai gali būti nustatyti remiantis kitais išmatuotais dydžiais, o dominantys parametrai nustatomi naudojant matematinius modelius bei

funkcines priklausomybes. Įprastai matavimai skirstomi į realaus laiko mastelio ar ne realaus laiko su didesniais vėlavimais ir diskretinio tipo matavimus.

Realaus laiko matavimai yra tokie matavimai, kurie yra pakankamai greiti ir gali būti pasitelkti procesui valdyti, pavyzdžiui, uždaryti valdymo kilpą. Tai reiškia, kad vėlavimo laikas pakankamai trumpas. Svarbu užtikrinti, kad būtų galimas aktyvus automatizuotas valdymas atsižvelgiant į proceso dinamiką. Šis laikas greitai augančioms ląstelėms, žinoma, yra trumpesnis nei lėtai augančioms ląstelėms.

Įprastai jutikliai skirstomi į du tipus pagal montavimo vietą: į montuojamus reaktoriaus viduje *in situ* tipo ir į *ex situ* tipo, kurie montuojami už reaktoriaus ribų. *In situ* tipo jutikliai yra montuojami reaktoriaus viduje ir leidžia pakankamai dideliu dažniu išmatuoti terpės parametrus, taip daug prisideddami prie realaus laiko matavimų ir automatizuoto valdymo. Atliekant *ex situ* tipo matavimą tūrio srautas yra pašalinamas iš reaktoriaus ir analizuojamas atskirai. Šis mėginys gali būti grąžintas į reaktorių, jei analizatorius veikia neinvaziškai (neturi įtakos mėginiui) ir nepažeidžiamas sterilumas. Jeigu mėginys paveikiamas analizės metu, po to jis turi būti sunaikintas ir nebegražinamas į bioreaktorių.

### **1.2.3. Matuojami parametrai biotechnologiniame procese**

#### **1.2.3.1. Temperatūra**

Temperatūros nustatymas yra svarbus biologinio proceso vystymuisi, taip pat atliekant kitas proceso operacijas tokias kaip sterilizavimą, koncentravimą ir gryninimą. Temperatūra įprastai matuojama 0-130 °C ribose. Temperatūrai matuoti gali būti naudojami gyvsidabrio-stiklo, bimetaliniai, slėgio lempučių termometrai, termoelementai ar termovaržiniai termometrai. Temperatūros matavimo prietaisai turi būti sterilizuojami garuose esant 120 °C. Dažnai temperatūra matuojama naudojant Pt100 ar Pt1000 platinos jutiklius, kurie yra ganėtinai tikslūs ir stabilūs [16].

#### **1.2.3.2. Slėgis**

Slėgio matavimai gali būti reikalingi dėl kelių priežasčių. Svarbi slėgio matavimo priežastis yra sauga. Bioreaktoriuose naudojama įranga yra apribota techninėmis savybėmis, iš kurių vienas yra veikimo slėgis. Todėl įranga turi būti pakankama darbiniam slėgiui atlaikyti. Taip pat, sterilizuojant terpę svarbu išmatuoti slėgį. Slėgis turi įtakos dujų tirpumui ir prisideda prie sterilumo išlaikymo. Standartinis matavimo jutiklis yra membraninis manometras, pagrįstas deformacijos ar talpos matavimais. Taip pat, naudojami slėgio matavimui pjezoelektriniai, talpiniai ar varžiniai jutikliai [16].

#### **1.2.3.3. pH**

Daugelyje procesų reikia stebėti ir kontroliuoti terpės pH, norint gauti maksimalią produkto išėigą, kadangi fermentų ir metabolinės pasižymi jautrumu pH vertei. PH gali būti kontroliuojamas pridendant atitinkamą kiekį šarminių ar rūgštinių tirpalų, atsižvelgiant į pH kitimą. pH matuojamas naudojant elektrodus užpildytus skysčiu arba geliu. Panardinus į terpę elektrodą sukuriamas gelinis sluoksnis su aktyviais vandenilio jonais, kurių difuziją veikia pH pokytis ir dėl šio pokyčio susidaro elektrodo potencialas, kurio vertė išmatuojama įprastai standartinio sidabro/sidabro chlorido elektrodo atžvilgiu. [5].

#### **1.2.3.4. Ištirpusio deguonies koncentracija (DO)**

Daugelio aerobinių fermentacijų metu svarbu, kad ištirpusio deguonies koncentracija nenukristų žemiau nurodyto minimalaus lygio. Ištirpusio deguonies koncentracijos matavimui naudojamas ištirpusio deguonies elektrodas. Matavimams įprastai naudojami galvaniniai arba polarografiniai elektrodai. Galvaniniai elektrodai dažniausiai naudojami mažame fermenteryje, o polarografiniai elektrodai dažniausiai naudojami bandomuosiuose arba gamybos bioreaktoriuose. Matavimo principas abiejų tipų elektrodų panašus: pro membraną, pralaidžią deguoniui, prasiskverbęs deguonis pasiekia katodą tokiu būdu sudarydamas srovę tarp anodo ir katodo. Tikslumui padidinti jie kompensuojami tiek slėgio, tiek temperatūros atžvilgiu [8].

#### **1.2.3.5. Oksidacijos-redukcijos potencialas**

Oksidacijos - redukcijos elektrodų fizinė konstrukcija yra panaši į stiklinių pH elektrodų, tik jutiklinis elementas pagamintas iš tauriųjų metalų: platinos (Pt) arba aukso (Au). Taurieji metalai reaguoja į visas tirpale esančių oksidacijos - redukcijos porų sumas, o signalas parodo ištirpusių komponentų vidurkį ir laisvų elektronų kiekį. Oksidacijos- redukcijos potencialo signalo laiko trajektorija gali turėti tipišką formą su etalonine. Tokiu būdu oksidacijos - redukcijos potencialas vaizduoja tipišką kokybiškai nežinomų komponentų modelį. Auginant anaerobą, oksidacijos redukcijos potencialo signalas gali parodyti anaerobiškumo laipsnį [3].

#### **1.2.3.6. Biomasės koncentracija**

Biomasė yra paprastas turimo biokatalizatoriaus kiekio matas ir neabejotinai svarbus pagrindinis kintamasis, nes jis nustato biomasės augimo ir (arba) produkto susidarymo greitį. Biomasės koncentracijos matavimui gali būti pasitelkiami jutikliai paremti optinių terpės ir filtravimo savybių, terpės tankio pokyčiais ir ląstelių dielektrinėmis savybėmis [17].

### **1.3. Biotechnologinių procesų bioreaktoriuje valdymas**

Bioreaktoriai yra pagrindiniai biocheminių ir biologinių farmacinių procesų, kuriuose pagrindinės kontrolės sistemos bando kontroliuoti auginimo aplinką ląstelėje, operacijų vienetai. Dažniausiai bioreaktoriuje reguliuojama temperatūra, slėgis, pH ir ištirpusio deguonies koncentracija. Temperatūra gali būti reguliuojama aušinimo vandens srauto greičiu, slėgis gali būti reguliuojamas dujų srautu. Terpės pH gali būti valdoma manipuliuojant amoniako tirpalo srauto greičiu (paprastai rūgšties tirpalo nereikia įpilti į bakterijų ląstelių kultūros terpę, nebent reikia kompensuoti bazės perteklių). Ištirpusio deguonies koncentracija paprastai reguliuojama valdant oro srauto greitį ir maišyklės maišymo greitį [1].

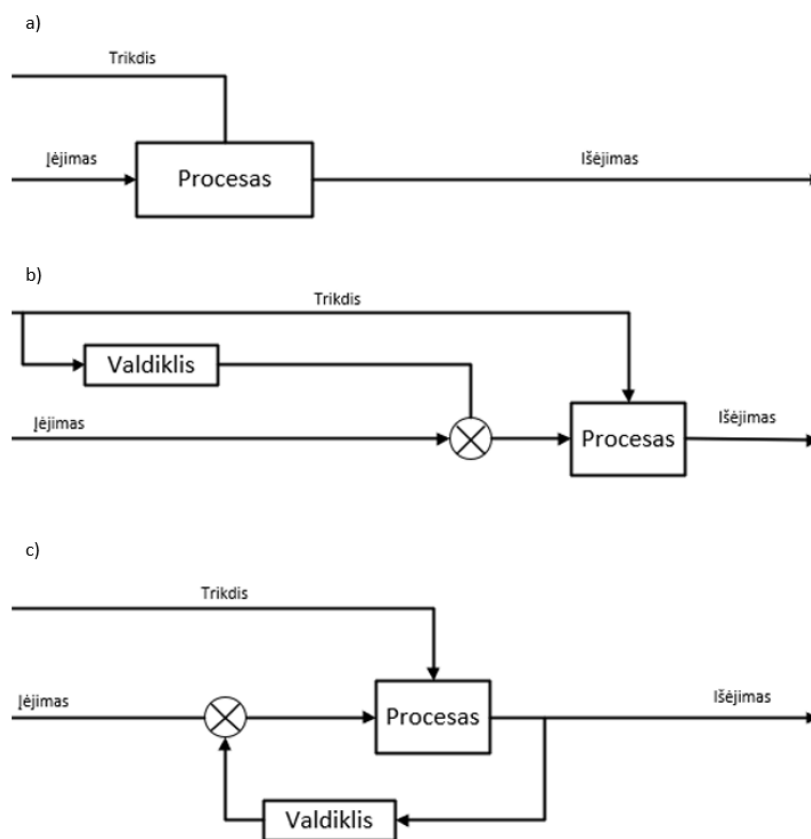
#### **1.3.1. Valdymo sistemos**

Valdymo sistemos procesuose yra naudojamos kontroliuoti procesą gaunant tam tikrus signalus ir parametrus sistemos išėjime keičiant įvestį. Pagal signalo tipą valdymo sistemos skirstomos į nepertraukiamo laiko, kuriuose signalai yra ir diskretaus laiko valdymo sistemas. Nepertraukiamo laiko valdymo sistemose visi signalai yra nenutrūkstami, o diskretaus laiko valdymo sistemose yra naudojami signalai yra diskretinio laiko.

Pagal įėjimų ir išėjimų skaičių sistemos skirstomas į SISO ir MIMO valdymo sistemas. SISO valdymo sistemos (*angl. Single Input and Single Output*) turi vieną įėjimo signalą ir vieną išėjimo

signalą, kai MIMO (*angl. Multiple Inputs and Multiple Outputs*) valdymo sistemos turi daugiau nei vieną įėjimo ir išėjimo signalus. [19]

Pagal valdymo ryšio tipą sistemas galima skirstyti į atvirojo ir uždarojo ryšio valdymo sistemas. Atvirose sistemose (1.3.1.1 a) paveikslas) išėjimo reikšmė nėra grąžinama įėjime, todėl valdymo reakcija nepriklauso nuo išėjimo. Proceso metu vykdomi iš anksto apskaičiuoti kintamųjų pokyčiai laike, kurie daro įtaką būsenos kintamiesiems. Atviro tipo sistemoje svarbus tikslus proceso modelis siekiant tikslesnio valdymo rezultato ir tokio tipo sistemose yra veikimo netikslumų atsiradus neįvertiniams trikdžiams. Uždarojo valdymo sistemose išėjimo vertė yra susiejama su įėjimo verte grįžtamoju ryšiu, todėl proceso išėjimas daro įtaką sistemos valdymui [19]. Uždaros sistemos pagal valdymą gali būti uždaro grįžtamo ryšio (1.3.1.1 c) pav.), trikdžio kompensavimo (1.3.1.1 b), mišrios. Uždaro ryšio sistemos valdomojo kintamojo išėjimo vertė palyginama su nuostato verte ir valdiklis nustatęs paklaidą grįžtamoju ryšiu keičia valdantįjį poveikį. Trikdžio kompensavimo sistemoje valdikliu stebima ne proceso išėjimo vertė, o trikdys, kurio įtaka yra mažinama reguliuojant proceso įėjimą. Trikdžio valdymo privalumas yra greitesnis atsakas į trikdį, tačiau nėra stebimas proceso išėjimo signalas. Taip pat, gali būti mišrios valdymo sistemos, kurios yra sudarytos iš kelių valdymo sistemų savybių. Pavyzdžiui, gali būti apjungiamos grįžtamojo ryšio ir trikdžio valdymo sistemos, kurios sąlygoja greitesnį trikdžio kompensavimą, bei sistemos reguliavimą atsižvelgiant į išėjimo parametrus.



1.3.1.1 pav. a) Atviro ryšio valdymo sistema, b) Trikdžio valdymo sistema c) Grįžtamojo ryšio valdymo sistema



### 1.3.2. Valdymo metodai

Geras pagrindinių valdymo sistemų veikimas pagerina procesų atkuriamumą. Geras proceso atkuriamas leidžia sumažinti procesų našumo rodikliams palyginti ir optimizuoti reikalingų eksperimentų skaičių, kurie gali būti brangūs ir reikalaujantys daug laiko. Taip pat, efektyviai valdomo bioreaktoriaus pranašumas yra galimybė didinti pajėgumą arba efektyvumą vykdant procesą arčiau fizinių apribojimų [1].

Bioprocėsų valdymui gali būti naudojami skirtingi reguliatoriai ir valdymo metodai priklausomai nuo pasirinktos sistemos. Bioreaktoriuose vykstantiems procesams gali būti naudojami skirtingi valdymo metodai. Vienas populiariesnių metodų valdymui naudoti proporcinis integralinius išvestinius dar žinomus kaip PID reguliatorius. Taip pat, valdymui pasitelkiamos kokybiniais modeliais ir neraiškia logika paremti valdymo metodai, pasitelkiami neuroniniai tinklai bei kitos valdymo sistemos. Dėl bioreaktoriuje vykstančių netiesinių procesų, kintančios dinamikos pastovių parametrų sistemos gali būti neefektyvios, todėl gali būti naudojamas adaptyvus valdymas, kuris leidžia proceso metu keisti valdymo parametrus.

#### 1.3.2.1. PID

Proporcinio integraliniai išvestiniai (PID) reguliatoriai naudojami paprastose mikrobu ir žinduolių ląstelių auginimo procesų valdymo sistemose. Šie reguliatoriai yra ganėtinai pigūs ir nesunkiai realizuojami. Bioprocėsų valdymo kokybė priklauso nuo proceso dinamikos sudėtingumo, triukšmo ir klaidų vykstant proceso kintamojo matavimui, valdiklių derinimo ir vykdomųjų prietaisų: vožtuvų, greičio pavaru, veikimo tikslumo. PID reguliatorius yra svarbu tinkamai suderinti, nes bioreaktoriaus veikimo kokybė priklauso nuo to, ar reguliatoriai yra paruošti ir sureguliuoti atsižvelgiant į proceso kitimą. PID valdiklių, turinčių fiksuotus nustatymo parametrus, veikimas nėra pakankamai tikslus esant reikšmingiems proceso dinamikos pokyčiams ar proceso kintamojo trikdžiams [4].

#### 1.3.2.2. Kokybiniai modeliai ir neraiški logika

Kokybinis modelis dažnai gali būti suformuluotas net tada, kai kultūros proceso eigai neįmanoma pritaikyti matematinio modeliavimo. Paprasčiausia forma yra taisyklėmis pagrįstas modelis, kuriame proceso elgsenai apibūdinti naudojama „JEIGU – TAI“ kalba. Tokias taisykles dažnai pateikia žmonės ekspertai (kvalifikuoti operatoriai). Pavyzdžiui, užuot bandžius modeliuoti pamaitinimo reikalavimus matematiškai, vartojami tokie terminai kaip „Jei gliukozės lygis per žemas, o deguonies suvartojimo greitis ląstelėse yra didelis, tada reikia pridėti gliukozės, jeigu sąlyga netenkinama, nepridėti gliukozės“. Tokio tipo taisyklėmis paremti algoritmai priskiriami *Fuzzy* sistemoms. *Fuzzy* algoritmai sujungia algebrą su žodinėmis taisyklėmis, kad būtų lengviau aprašyti sudėtingas sistemas ir efektyviai apspręsti proceso neapibrėžtumą. Apytiksliai samprotavimai įtraukia realaus proceso sistemos žinias į modelį ir vietoj tradicinių duomenų rinkinių naudoja nepilnus rinkinius. Tada, jie laikomi tikrais arba klaidingais, atsižvelgiant į tai, ar kiekvienas elementas yra, ar nėra įtrauktas į tam tikrą duomenų rinkinį [6].

#### 1.3.2.3. Neuroniniai tinklai

Neuroniniai tinklai (NN) ypač tinka modeliuoti sudėtingus netiesinius procesus. Kai įprastiniai kompiuteriniai metodai valdymo problemas, remiantis algoritmais, išsprendžia naudodamiesi kognityviniu skaičiavimo metodu, neuroniniai tinklai taiko visiškai kitokį būdą. Juos sudaro daugybė

sujungtų, lygiagrečiai veikiančių duomenų apdorojimo įrenginių. Šios koncepcijos sukūrimą įkvėpė žmogaus smegenyse veikiančios informacijos apdorojimo procesai. Naudojamų komponentų įvesties ir išvesties mazgų skaičių lemia proceso modeliavimo problemos pobūdis, taip pat įvesties duomenų pateikimas ir reikiamo išėjimo signalo forma.

Neuroniniai tinklai išdėsto paslėptus vienetus, kad suprastų modelio parametrus, kurie nėra tiesiogiai prieinami, ir tai paaiškina modelio (juodosios dėžės) pobūdį. Kiekvieno paslėpto ir išvesties vieneto aktyvumą lemia tiek ankstesniojo sluoksnio veikla, tiek jungčių svoris. Tos jungtys lemia, ar vienas vienetas gali paveikti kitus, o svoriai nurodo tokios įtakos stiprumą. Neuroninių tinklų neįmanoma užprogramuoti, jie turi būti apmokyti atlikti kiekvieną konkrečią užduotį naudodami istorinius proceso duomenis, gautus iš ankstesnių bandymų. Tokius pavyzdžius sudaro įvesties vienetų veiklos modelis kartu su norimu išvestinių vienetų veiklos modeliu. Norint sumažinti klaidą tarp norimų ir faktinių išėjimų, kiekvienos jungties svoris yra koreguojamas, pavyzdžiui, naudojant atgalinio sklaidimo algoritmą. Neuroniniai tinklai mokosi pagal pavyzdį, panašų į tai, kaip mokosi biologinės sistemos. Kadangi tinklas problemas sprendžia pats, jo veikimas gali būti nenusipėjamas. Tačiau tinkamai apmokytas neuroninis tinklas geba analizuoti duomenis ir apskaičiuoti proceso vertes [6].

#### **1.3.2.4. Modelio numatomasis valdymas (MPC)**

Modelio numatomajame valdyme (MPC) yra naudojamas dinaminis proceso modelis, kuris gali modeliuoti būsimą proceso raidą, atsižvelgiant į galimas imituojamas valdomojo kintamojo reikšmes. Paprastai būsimas sistemos proceso veikimas apskaičiuojamas iš anksto numatyto prognozavimu. Įprastai optimizuojant sistemą naudojant modelio numatytąjį valdymą naudojamos sąnaudų funkcijos proceso kintamųjų įvertinimui. Kadangi diferencialinių lygčių sistema turi būti išspręsta realiu laiku, MPC reikalauja skaičiavimo, todėl reikalingas būsenos įvertinimo elementas [3].

#### **1.3.2.5. Adaptyvusis valdymas**

Adaptyvusis valdymas yra valdymo metodas, kurį naudoja valdiklis norėdamas prisitaikyti prie kontroliuojamos sistemos, kurios parametrai skiriasi arba iš pradžių yra neaiškūs. Adaptyviajam valdymui nebūtina išankstinė informacija apie neapibrėžtų ar laike besikeičiančių parametru ribas, o svarbus pats valdymo dėsnis. Esant proceso dinamikos pokyčiams reikalingi ir valdymo parametru pokyčiai. Bioprocesuose, kai proceso sąlygos nėra pilnai žinomos ir proceso modelis nėra tiksliai apibrėžtas, gali būti daug pokyčių proceso sąlygose, atsižvelgiant į skirtingus mikroorganizmų gyvavimo ciklus. Todėl reikalingi realaus laiko matavimais pagrįsti grįžtamojo ryšio mechanizmai.

Adaptyviosios valdymo struktūros yra pagrįstos skirtingų vertinimo algoritmų, galinčių nustatyti ne realaus laiko parametro vertes, projektavimu. Kiekvienas valdiklis keičia savo išėjimą reaguodamas į pokyčius procese, todėl iš dalies galėtų būti laikomi adaptyviais, tačiau adaptyviame valdyme valdiklis ne tik keičia savo išėjimą bet atsižvelgia į valdymo strategiją ir gali sureguliuoti savo parametrus arba kitaip pakeisti savo valdymo algoritmą, kad pritaikytų esminius proceso elgsenos pokyčius.

Išskiriamos adaptyvaus valdymo kategorijos:

- Modeliu pagrįstas adaptyvus valdymas;
- Adaptyvus valdymas be modelio;
- Ekspertinių sistemų arba taisyklėmis paremtas ar dirbtinio intelekto adaptyvus valdymas.

Adaptyviais modeliais paremti valdikliai modelius generuoja automatiškai iš archyvinių duomenų. Tai ne tik patogiu, palyginti su valdiklių rankiniu projektavimu, bet ir leidžia nuolat atnaujinti modelį, kad teoriškai valdiklis galėtų ir toliau tiksliai numatyti tolimesnius procesus, net jei jie kinta laike.

Adaptyvieji, modelio nereikalaujantys valdikliai taip pat išveda savo kontrolės dėsni pagal archyvinių duomenų analizę, tačiau iš pradžių nesukuria proceso modelio. Pagal šį pobūdį galima išvelgti panašumų į tradicinį PID valdiklį. Tačiau adaptyvus valdymo dėsnis sugeneruoja žymiai išsamesnę informaciją iš paskutinių klaidų analizės, kad būtų galima prisitaikyti prie dabartinio proceso elgesio [12].

Ekspertinės sistemos valdiklis pagal naudojamą algoritmą atlieka proceso valdymą imituojant operatorių ar inžinierių sukauptas žinias. Iš dalies, dauguma ekspertinių sistemos valdiklių nėra adaptyvūs, nes įprastai valdymo algoritmas yra iš anksto nustatytas, o taisyklių adaptavimui realiu laiku reikalingas eksperto dalyvavimas [12].

#### **1.3.2.5.1. MFA valdymas**

Adaptyvus valdymas, nenaudojant modelio, (toliau MFA) yra tiesioginis realaus laiko valdymas. MFA tipo valdymui nereikalingos kiekybinės žinios apie procesą, nereikalingas modelio identifikavimas, nereikalingas specialus valdiklio dizainas specifiniam procesui, nereikalingas sudėtingas rankinis valdymo parametrų derinimas. MFA tipo valdymo sistemos valdymo tikslas – proceso kintamajam sekti nurodytą vertę pagal proceso dinamikos, trikdžių ir nuostato vertės pokyčius arba, kitaip tariant, mažinti reikiamo proceso kintamojo paklaidą realiu laiku.

Identifikavimu paremti valdymo metodai yra sunkiau valdomi dėl galimo valdymo ir identifikavimo procesų kolizijos. MFA valdymo algoritmui nereikalingas proceso identifikavimo mechanizmas. Pasileidus MFA adaptyviam valdymui iškart yra vykdomas valdymas. MFA algoritmo pagrindinis tikslas yra sumažinti skirtumą tarp proceso išėjimo ir nustatytos vertės, kuris yra vykdomas keičiant svorinius koeficientus.

MFA valdikliams, kaip ir adaptyviems valdikliams, nereikalingas rankinis derinimas. MFA valdiklis gali prisitaikyti prie naujų sąlygų įvykus pasikeitimams proceso dinamikoje, apkrovoje, triukšmuose neatliekant rankinio derinimo. MFA adaptyvus valdymas naudodamas dirbtinį neuroninį tinklą atnaujinama svorinius koeficientus ir taip keičia valdomo proceso dinamiką. Svorinių koeficientų atnaujinimo algoritmas pagrįstas tikslu sumažinti paklaidą arba skirtumą tarp užduotos nuostato vertės ir proceso kintamojo. Kadangi valdymo ir proceso tikslai mažinti paklaidą tarp proceso kintamojo ir nuostato sutampa svorinių koeficientų keitimas gali padėti mažinti klaidą keičiantis proceso dinamikai. MFA valdymas paremtas įėjimo verčių vėlinimų per vieną diskretinio laiko intervalą. Taip valdiklis gali kaupti informaciją apie senesnius duomenis ir jais remiantis valdyti procesą. Palyginimui, PID tipo valdiklis gali prisiminti esamą ir praėjusius du įrašus [18].

#### **1.3.3. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas**

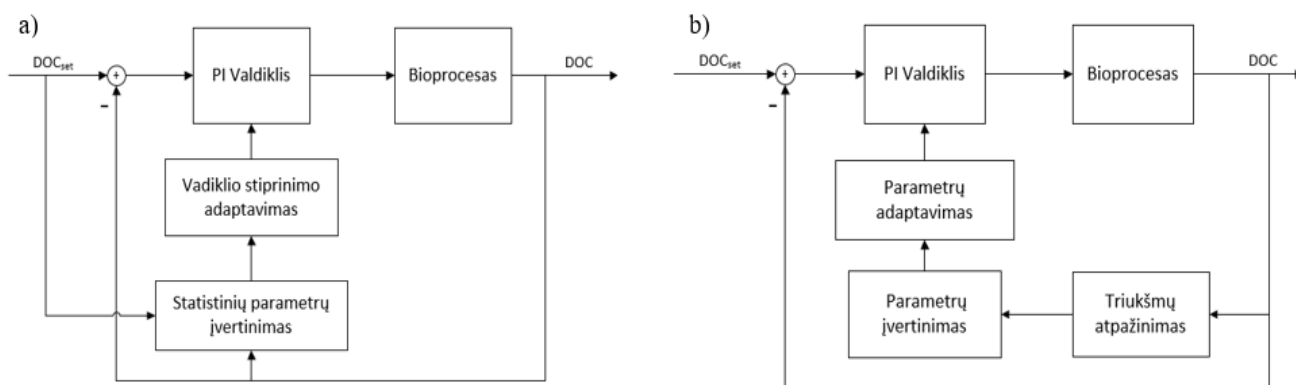
Biotechnologinių procesų valdyme svarbus parametras yra ištirpusio deguonies koncentracija. Mikroorganizmai deguonį pasisavina iš terpės skysčio, todėl deguonis turi būti ištirpęs siekiant ląstelių augimo, o deguonies tirpumas yra mažas ląstelių augimo terpėje. Ištirpusio deguonies koncentracija yra svarbus parametras ląstelių efektyviam gyvavimui bioreaktoriuje. Tūrinis masės perdavimo koeficiento  $K_{La}$  matavimas gali suteikti svarbios informacijos apie procesą. [20] Tūrinis masės perdavimo koeficientas  $K_{La}$  nusako medžiagos perėjimo iš dujų būsenos į skystą būseną

efektyvumą ir priklauso nuo bioreaktoriaus parametrų: dydžio, maišymo, aeravimo srauto, ir augimo terpės. Šis parametras yra pakankamai svarbus, nes deguonies tirpumas yra mažas ląstelių augimo terpėje.

Ištirpusio deguonies koncentracija yra svarbus bioreaktoriuje vykstančių procesų technologinis parametras. Ištirpusio deguonies valdymas yra sudėtingas dėl biotechnologinio proceso dinamikos ir sudėtingos netiesinės elgsenos bioreaktoriuje. Ištirpęs deguonis gali būti reguliuojamas bioreaktoriuje keičiant aeravimo srautą arba maišyklės maišymo greitį. Literatūroje randama skirtingų būdų ir metodų ištirpusio deguonies valdymo sprendimams. Netiesiniam ištirpusio deguonies valdymui dažnai pasitelkiamos adaptyvios valdymo sistemos.

Literatūros šaltinyje [13] pateiktas ir tiriamas ištirpusio deguonies adaptyvus valdymas. Tiriamos dvi adaptyvios PI reguliatorių valdymo sistemos, sistemų schemas pateiktos 1.3.3.1 paveiksle. 1.3.3.1paveiksle a) pateikta schema skirta pastoviam ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato sekimui. 1.3.3.1 paveiksle b) pateikta sistema paremta trikdžių analize uždaroje sistemoje ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti spartaus ląstelių auginimo procese.

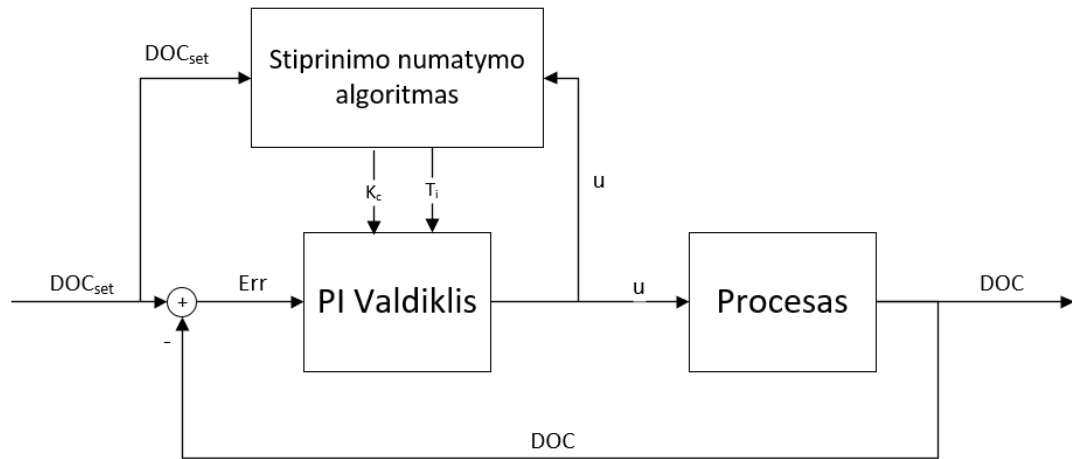
Straipsnyje nagrinėjamoje valdymo sistemoje 1.3.3.1 paveiksle a) skirtai pastovaus nuostato sekimui PI regulatoriaus adaptacijos algoritme naudojami realiu laiku vertinami du statistiniai parametrai: vidutinė absoliutinė deviacija ir vidutinė paklaidos vertė slenkančio lango funkcijoje. Šie parametrai naudojami derinant valdymo stiprinimo koeficientą proceso vykdymo metu. Sistema skirta sekti pastoviai ištirpusio deguonies nuostato vertei, nes nuostato vertės keitimas iškreiptų statistinius įvertinimo duomenis slenkančiame lange, pagal kurio duomenis paremtas valdymo adaptavimas. Tyrime atlikti modeliavimai parodė, jog tinkamos derinimo parametrų vertės užtikrina patikimą valdymo stiprinimo adaptavimą, tačiau ši sistema prie didelio ląstelių tankumo yra nestabili.



**1.3.3.1 pav.** Adaptyvios ištirpusio deguonies valdymo sistemos

M. Butkaus straipsnyje [23] pateikiama stiprinimo numatymo valdymo sistema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti bioreaktoriuje. Adaptyvi valdymo sistema skirta nuostato sekimui ir trikdžių mažinimui biotechnologiniuose procesuose. PI regulatoriaus stiprinimo numatymas paremtas valdiklio įėjimo ir išėjimo signalais, kuriems nereikia papildomų proceso kintamųjų matavimų adaptuojant reguliatorių. Valdymo sistemos schema pateikta 1.3.3.2 paveiksle. Iš atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų pastebėta, jog naudojant stiprinimo numatymo valdymą sistema buvo stabili ir valdymo rezultatas geresnis nei sistemos su pastovių parametrų PI reguliatoriumi. Lyginant pastovių parametrų PI ir adaptyvaus stiprinimo numatymo algoritmo vidutines absoliutines

paklaidas pastebėta, kad trikdžių šalinimo paklaidos pastovių parametų PI reguliatoriaus sistemos paklaida 0,166%, o adaptyvios sistemos paklaida 0,063%. Nuostato sekimo PI reguliatoriaus sistemos vidutinė absoliutinė paklaida 0,071% kai adaptyvios 0,028%.



**1.3.3.2 pav.** Adaptyvios stiprinimo numatymo valdymo sistemos schema

## 2. Metodinė dalis

### 2.1. Biotechnologinis procesas ir jo modelis

Darbo metu modeliuojamas ir valdomas biotechnologinis periodinis su pamaitinimu procesas bioreaktoriuje. Naudojamas biotechnologinis e. coli bakterijų kultivavimo procesas rekombinuotų baltymų sintezei bioreaktoriuje, kurio matematinis modelis aprašytas D. Levišausko straipsnyje [14] matematinėmis lygtimis (1) – (6), o modelio parametrų vertės pateiktos 2.1 lentelėje.

Biomasės koncentracija:

$$\frac{dx}{dt} = \mu(s)x - (F_1 + F_2) \frac{x}{w} \quad (1)$$

Substrato koncentracija:

$$\frac{ds}{dt} = -q_s(s)x + F_1 \frac{s_f}{w} - \frac{(F_1 + F_2)s}{w} \quad (2)$$

Terpės tūris:

$$\frac{dV}{dt} = F_1 + F_2 + F_3 \quad (3)$$

Biomasės augimo greitis:

$$\mu(s, T) = \mu_{max} \frac{s}{k_s + s} \frac{k_i}{k_i + s} e^{\alpha(T - T_{ref})} \quad (4)$$

Substrato suvartojimo greitis:

$$q_s(s) = \frac{1}{Y_{xs}} \mu(s) + m \quad (5)$$

Deguonies suvartojimo greitis:

$$OUR = Y_{ox} \mu x V + m_{ox} x V \quad (6)$$

Čia:  $x$  - biomasės koncentracija, g/kg;  $s$  - substrato koncentracija, g/kg;  $w$  – kultūros masė, kg;  $\mu$  - biomasės augimo greitis, kg/s;  $F_1$  – substrato pamaitinimo greitis, kg/s;  $F_2$  - masės srauto greitis fermenteryje dėl šarmų tiekimo, terpės garavimo ir anglies praradimo CO<sub>2</sub> išmetamosiose dujose, kg/s;  $F_3$  – mėginių fermenteryje ėmimo greitis, kg/s;  $q_s$  – substrato suvartojimo greitis, g/g/s;  $s_f$  – substrato koncentracija pamaitinimo tirpale, g/kg;  $k_s$  – Monodo konstanta substrato suvartojimui, k/kg;  $k_i$  – slopinimo konstanta substrato suvartojimui, g/kg;  $\alpha$  – temperatūrinė konstanta, 1/°C;  $T$  – temperatūra, °C;  $T_{ref}$  – etaloninė temperatūra, °C;  $Y_{xs}$  – biomasės/substrato išeiga, g/g;  $m$  – biomasės palaikymo koeficientas, g/g/s;  $Y_{ox}$  – deguonies sunaudojimo išeiga susijusi su biomasės augimu, g/g;  $m_{ox}$  – deguonies suvartojimo parametras susijęs su biomasės palaikymu, g/g/s;

## 2.1 lentelė. Bioproceso modelio parametrai

Parametras	Vertė	Parametras	Vertė
x (0)	0,116 g/kg	k <sub>μ</sub>	0,0174 1/s
s (0)	9,5 g/kg	k <sub>s</sub>	0,00333 g/kg
V (0)	50,05 l	k <sub>i</sub>	93,8 g/kg
α	0,0495 1/°C	Y <sub>xs</sub>	0,46 g/g
T <sub>ref</sub>	37 °C	Y <sub>ox</sub>	0,5
s <sub>f</sub>	151 g/kg	m <sub>ox</sub>	4,1666*10 <sup>-5</sup> g/g/s
m	6,722*10 <sup>-6</sup> g/g/s		

Matematinis modelis, skirtas apibūdinti ištirpusio deguonies koncentraciją įtakančius veiksnius ir procesus ištirpusio deguonies procesui valdyti naudojamas analogiškas kaip ir D. Levišausko pateiktame literatūros šaltinyje [13]. Ši proceso dalis pateikta (7) – (12) diferencialinėmis lygtimis.

Matematinio modelio lygtis (7) aprašo oro tiekimo sistemos dinamiką, (8) išraiškoje apibrėžta maišymo greičio, kuris yra valdantysis parametras, dinamika. Diferencialinėje lygtyje (9) atvaizduojamas deguonies masės balansas skystoje agregatinėje būsenoje, o (10) formulėje aprašytas deguonies masės balansas dujinėje agregatinėje būsenoje. Diferencialinėse lygtyse (11) ir (12) nurodo antros eilės ištirpusio deguonies elektrodo dinamiką. Modelio parametrų vertės panaudotos iš D. Levišausko [21] pateiktų modelio parametrų ir pateiktos 2.2 lentelėje.

Oro tiekimo srautas:

$$\frac{dQ_{air}}{dt} = \frac{1}{T_Q(Q_{air_{set}} - Q_{air})} \quad (7)$$

Maišyklės sūčiai:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{T_N} (N_{set} - N) \quad (8)$$

Ištirpusio deguonies koncentracija:

$$\frac{dc_{do}}{dt} = -OUR_v \frac{c_{do}}{K_{ca} + c_{do}} + \alpha N^\beta Q_{air}^y \left( \frac{y_{O_2}}{H} - c_{do} \right) \quad (9)$$

Deguonies dalis išmetamose dujose:

$$\frac{dy_{O_2}}{dt} = \frac{Q_{air}}{V} \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) (0.21 - y_{O_2}) - \alpha N^\beta Q_{air}^y \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \left( \frac{y_{O_2}}{H} - c_{do} \right) v_{mol} \quad (10)$$

Pagalbinis kintamasis:

$$\frac{da_{el}}{dt} = \frac{1}{T_{el1}} \left( 100 \frac{Hc_{do}}{0.21} - a_{el} \right) \quad (11)$$

Ištirpusio deguonies matavimo elektrodo signalas:

$$\frac{dc_{el}}{dt} = \frac{1}{T_{el1}} (a_{el} - c_{el}) \quad (12)$$

Čia:  $Q_{air}$  – tiekiamo oro srautas, L/s;  $Q_{air\_set}$  – nustatyta oro tiekimo srauto vertė, L/s;  $N$  – maišymo greitis, 1/s;  $N_{set}$  – nustatyta maišymo greičio vertė, 1/s;  $y_{O_2}$  – išmetamosiose dujose esanti deguonies dalis;  $OUR_v$  – tūrinis deguonies įsisavinimo greitis, mmol/L/s;  $c_{do}$  – ištirpusio deguonies koncentracija absoliutiniais vienetais, mmol/L;  $a_{el}$  – tarpinis kintamasis, %;  $c_{el}$  – ištirpusio deguonies elektrodo signalas, %;  $H$  – Henrio konstanta, L/mmol;  $v_{mmol}$  – vieno mmol dujų tūris, L/mmol;  $T_Q$  – oro padavimo sistemos laiko konstanta, s;  $T_N$  – maišymo sistemos laiko konstanta, s;  $T_{el1}$ ,  $T_{el2}$  – ištirpusio deguonies elektrodų laiko konstantos, s;  $\varepsilon$  – dujų užlaikymo parametras dujų-skysčio dispersijoje.

Svarbu paminėti, kad realūs ištirpusio deguonies matavimai pasireiškia su triukšmu. Todėl kuriant valdymo sistemos imitavimo programą prie ištirpusio deguonies elektrodo signalo pridodamas baltasis Gauso triukšmas:

$$c_{el\_tr}(k) = c_{el}(k) + \sigma * Randn \quad (13)$$

Čia  $c_{el\_tr}$  išmatuota ištirpusio deguonies koncentracijos vertė su pridėtu triukšmo signalu;  $\sigma$  – standartinė deviacija (0,1%),  $Randn$  – atsitiktiniai skaičiai pasiskirstę pagal normalinį dėsnį,  $k$  – indeksas, nurodantis diskretinį matavimo momentą.

**2.2 lentelė.** Ištirpusio deguonies modelio parametrai

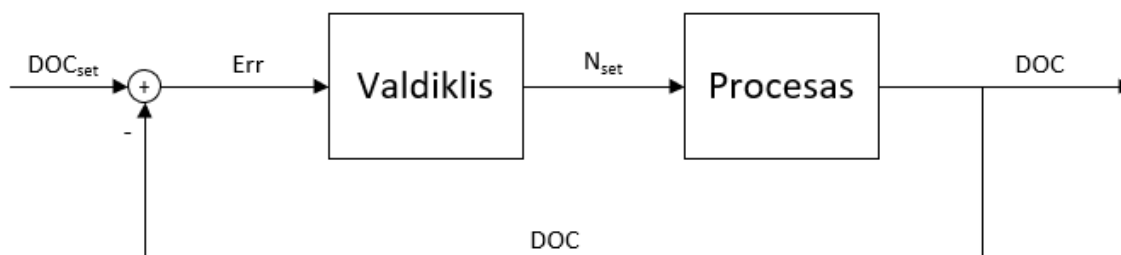
Parametras	Vertė	Parametras	Vertė
H	0,7906 L/mmol	$\gamma$	0,2
$K_{ca}$	0,00265 mmol/L	$v_{mmol}$	0,0224 L/mmol
$T_{el1}$	10 s	$Q_{air}(0)$	2,0 L 1/s
$T_{el2}$	2 s	$N(0)$	0,1 1/s
$T_Q$	1 s	$C_{do}(0)$	0,0266 mmol/L
$T_N$	1 s	$y_{O_2}(0)$	0,2099
$\beta$	2	$a_{el}(0)$	10 %
$\alpha$	0,000008	$c_{el}(0)$	10 %
$\varepsilon$	0,15		

## 2.2. Sistemos valdymas

Dinaminiai procesai bioreaktoriuje periodiniame su pamaitinimu procese ženkliai kinta veikimo metu. PI reguliatorius su pastoviais derinimo parametrais neužtikrina kokybiško ištirpusio deguonies koncentracijos reguliavimo tokiuose procesuose, nes suderinus jį viename darbo taške, kitose proceso fazėse jo dinamika ženkliai skiriasi ir gaunamas švytuojantis arba pakankamai vangus pereinamasis procesas. Todėl taikomi adaptyvus valdymo metodai, kurių metu keičiami valdymo parametrai. Norint taikyti adaptyvų PI reguliatorių reikia sukurti procesu pagrįstą modelį adaptacijai, o pramoniniuose procesuose dažnai nepakanka žinių tokiam modeliui sukurti. Pramoniniuose procesuose dažniausiai proceso modeliai adaptacijai nėra kuriami, nes tokie modeliai būtų per sudėtingi arba gali trūkti žinių jiems sukurti. Todėl tikslinga kurti ir naudoti tokius algoritmus, kuriems tokių modelių nereikia. Todėl kuriamas adaptyvus valdymas naudojant MFA neurovaldiklį.



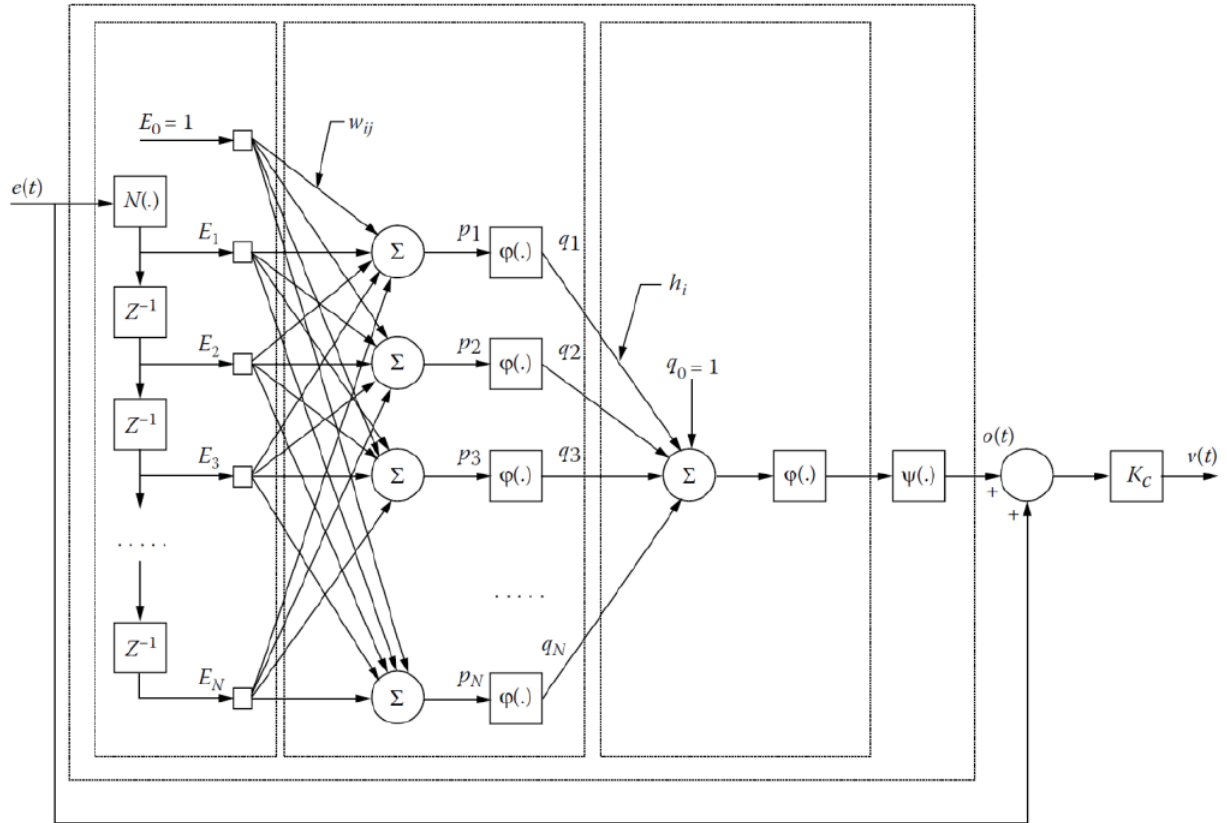
Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas atliekamas reguliuojant maišyklės sūkius. Sistemos valdymas atliekamas neigiamo grįžtamojo ryšio uždaro kontūro sistema. Valdymo schema pateikta 2.2.1 paveiksle. Ištirpusio deguonies koncentracijos vertė proceso išėjime DOC palyginama su nuostato verte (atimamas iš nuostato signalo sistemos išėjimo kintamasis ir gaunamas paklaidos signalas). Valdiklis, pagal įėjime gautą paklaidos vertę, keičia maišyklės sūkių nuostato  $N_{set}$  vertę, taip koreguodamas maišyklės sūkius, kurie daro įtaką ištirpusio deguonies koncentracijai.



**2.2.1 pav.** Valdymo schema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti

### 2.2.1. MFA valdymo sistema ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti

Sistemoje ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti pasirinktas MFA (*angl. Model Free Adaptive*) valdymas. Prie valdiklio įėjimo prijungiamas paklaidos (maišyklės sūkių nuostato ir proceso išėjimo skirtumo) signalas. MFA valdymo struktūra pateikta 2.2.1.1 paveiksle. Valdiklyje panaudotas dirbtinio perceptrono neuroninis tinklas, sudarytas iš vieno įėjimo sluoksnio su trimis neuronais paslėptame sluoksnyje ir vieno išėjimo sluoksnio neurono[22].



2.2.1.1 pav. MFA valdymo struktūra [22]

Įėjimo sluoksnyje įvesties signalas  $e(t)$  yra normalizuojamas diapazonu nuo -1 iki 1 normalizavimo bloke „N(.)“ ir paverčiamas klaidos signalu  $E_1$ . Klaidos signalas  $E_1$  yra vėlinamas per vieną iteraciją vėlinimo blokuose „Z<sup>-1</sup>“ ir taip yra sugeneruojamas normalizuotų klaidų parametrų rinkinys nuo  $E_1$  iki  $E_N$ . Tokiu būdu nenutrūkstamas paklaidos signalas  $e(t)$  yra paverčiamas atskirais signalais  $E_1, E_2, E_3$ , kurie naudojami kaip įėjimai į neuroninį tinklą. Signalai  $E_i$ , per neuroninius tinklo ryšius perduodami paslėpto sluoksnio neuronams, keliu įvertintu individualiu svorio koeficientu  $w_{ij}$ , kur  $i=1,2,3$  ir  $j=1,2,3$ . Taip pat, kaip ir užvėlinti  $E_1, E_2, E_3$  prie kiekvieno paslėptojo sluoksnio neurono pridedama pradinė pastovi  $E_0=1$  vertė, o ryšio svoriai  $w_{0j}$  yra pastovūs ir lygūs  $w_{0j}=1$  ir taip gaunami signalai  $p_j$ , kur  $j=1,2,3$  ir reiškia neurono numerį paslėptame sluoksnyje [12].

Sugeneruojamas signalas  $q_j$ , perleidžiant  $p_j$  per aktyvavimo funkciją  $\varphi$ , kuri susieja realius skaičius nuo 0 iki 1 ir yra apibrėžiama (14) formulėje:

$$\varphi(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (14)$$

Kiekvienas paslėpto sluoksnio išvesties signalas perduodamas į vieną išėjimo sluoksnio neuroną keliu, pasvertu individualiu svorio koeficientu  $h_i$ , kur  $i=1,2,3$ . Šie signalai susumuojami taip pat pridedant  $h_0=1$ .

$$p_j(n) = \sum_{i=0}^N w_{ij}(n)E_i(n) \quad (15)$$

$$q_j(n) = \varphi(p_j(n)) \quad (16)$$

$$o(n) = \psi \left( \varphi \left( \sum_{j=0}^N h_j(n) q_j(n) \right) \right) = \sum_{j=0}^N h_j(n) q_j(n) \quad (17)$$

$$v(t) = K_c(o(t) + e(t)) \quad (18)$$

Čia:  $n$  - iteracijos numeris,  $o(t)$  - nenutrūkstama  $o(n)$  funkcija,  $v(t)$  - yra valdiklio išvestis,  $K_c$  - valdymo stiprinimo koeficientas, kuris skirtas valdymo signalo reguliavimui, ir yra svarbus reguliuojant valdiklio veikimą arba išlaikant sistemos stabilų diapazoną.

Siekiant nuolat atnaujinti MFA valdymo svorio koeficientų vertes naudojamas tiesioginio mokymosi algoritmas, kuris pateiktas žemiau:

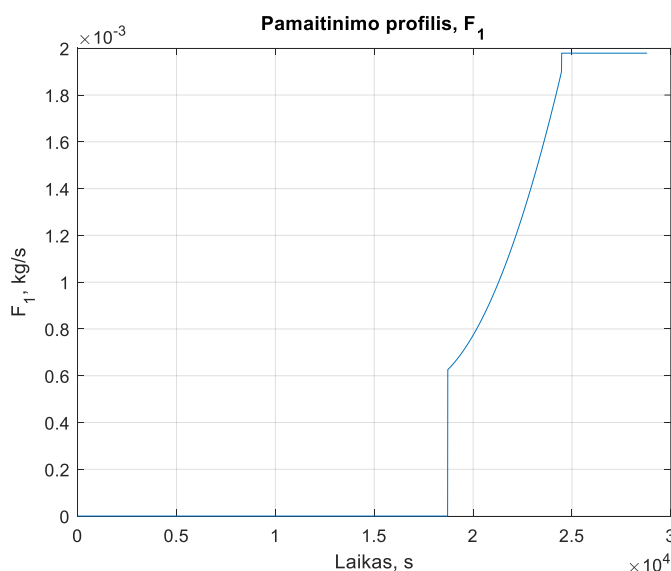
$$\Delta w_{ij}(n) = \eta K_c \frac{\partial y(n)}{\partial u(n)} e(n) q_j(n) (1 - q_j(n)) E_i(n) \sum_{k=0}^N h_k(n) \quad (19)$$

$$\Delta h_j(n) = \eta K_c \frac{\partial y(n)}{\partial u(n)} e(n) q_j(n) \quad (20)$$

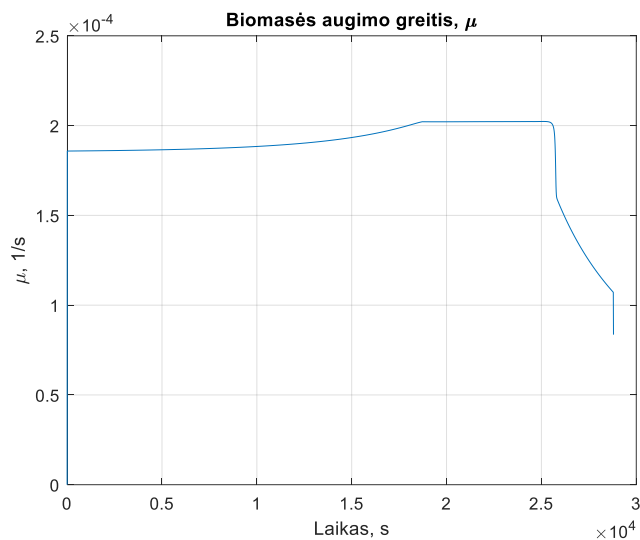
Kur  $\eta$  yra mokymosi greitis, o dalinės išvestinės  $\partial(n)/\partial(n)$  yra  $y(t)$  gradientas  $u(t)$  atžvilgiu, kuris reiškia išvesties  $y(t)$  jautrumą įvesties  $u(t)$  kitimams [15].

### 2.3. Biotechnologinio modelio realizavimas Matlab ir Matlab/Simulink programinėje įrangoje

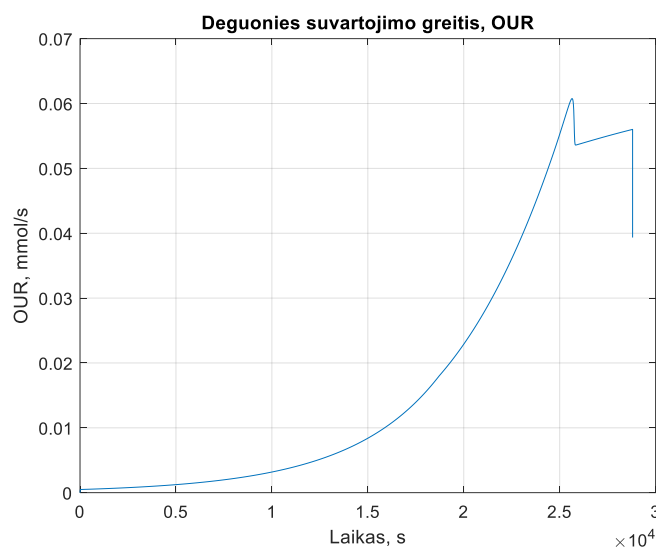
Aprašytas biotechnologinis proceso modelis realizuotas Matlab ir Matlab/Simulink programinėje įrangoje. Proceso trukmė 28800 sekundžių, kas atitinka 8 valandas. Laiko diskretizavimo periodas 0,2s. Į sistemą paduodamas pamaitinimo srauto  $F_1$  profilis realizuotas funkcija, kurios grafikas pateiktas 2.3.1 paveiksle. Biomasės koncentracijos augimo greičio  $\mu$  ir deguonies suvartojimo greičio OUR grafikai pateikti 2.3.2 ir 2.3.3 paveiksluose.



2.3.1 pav. Pamaitinimo profilio  $F_1$  grafikas



**2.3.2 pav.** Biomės augimo greičio  $\mu$  grafikas

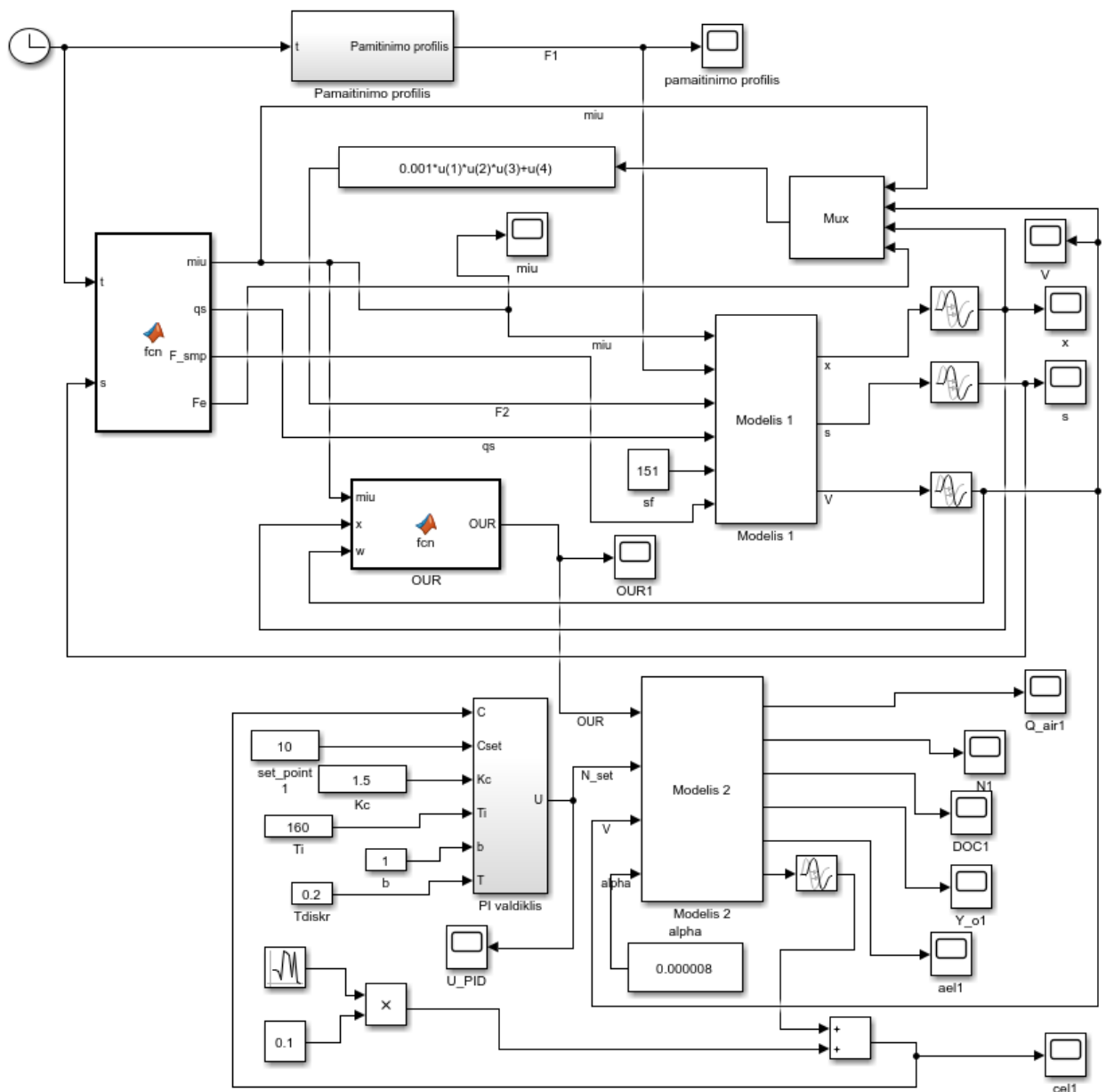


**2.3.3 pav.** Deguonies suvartojimo greičio OUR grafikas

Matlab ir Matlab/Simulink aplinkose realizuotas proceso modelis. Matlab/Simulink aplinkoje realizuota valdymo sistema naudojant PI tipo valdymą su pastoviais parametrais. Matlab programiniame kode realizuotas MFA tipo valdymo proceso modelis su uždarojo grįžtamojo valdymo sistema, kurio veikimas aprašytas 2.2.1 skyriuje ir funkcinė schema pateikta 2.2.1.1 paveiksle.

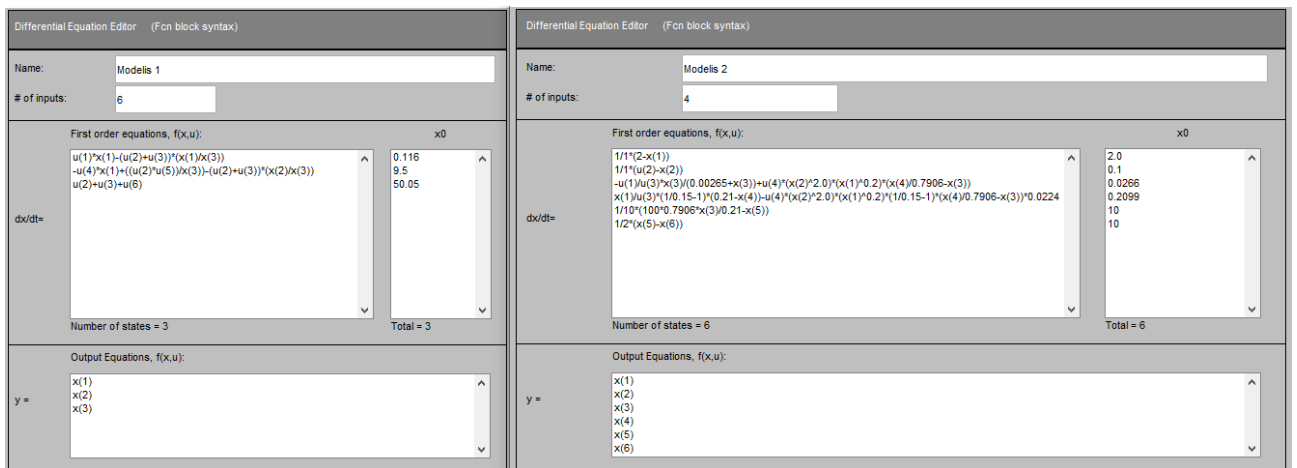
### **2.3.1. Biotechnologinio proceso su PI tipo valdymu realizavimas Matlab/Simulink programinėje įrangoje**

Biotechnologinio proceso valdymo sistema su PI tipo valdymu realizuota Matlab/Simulink programoje, o programos grafinis modelis pateiktas 2.3.1.1 paveiksle.



2.3.1.1 pav. Biotechnologinio proceso ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo Matlab/Simulink modelis su PI tipo pastovių parametų valdymu

Programos bloke „Pamaitinimo profilis“ yra sugeneruotas pamaitinimo profilis  $F_1$ , kuris pateiktas 2.3.1 paveiksle. Proceso matematinio modelio diferencialinės lygtys realizuotos dvejais diferencialinių lygčių redaktoriaus DEE blokais: (1) – (3) diferencialinės lygtys realizuotos bloke „Modelis 1“, o (7)-(11) lygtis realizuotos diferencialinių lygčių redaktoriaus DEE bloke „Modelis 2“. Diferencialinių lygčių redaktoriaus DEE blokai „Modelis 1“ ir „Modelis 2“ pateikti 2.3.1.2 paveiksle. Bloke „PI valdiklis“ realizuotas uždarojo neigiamojo ryšio valdymo sistemos PI valdymas. PI valdymas naudojamas su pastoviais parametrais: stiprinimo koeficientu  $K_c=1,5 \text{ \%}^{-1}\text{s}^{-1}$  ir integravimo laiko pastoviąja  $T_i=160 \text{ s}$ .



**2.3.1.2 pav.** Biotechnologinio proceso modelio (1) – (3) diferencialinių lygčių realizavimas „Modelis 1“ DEE bloke (kairėje) ir (7) – (12) diferencialinių lygčių realizavimas „Modelis 2“ DEE bloke

### 2.3.2. Biotechnologinio proceso su MFA adaptyviu valdymu ištirpusio deguonies koncentracijai reguliuoti realizavimas Matlab programinėje aplinkoje

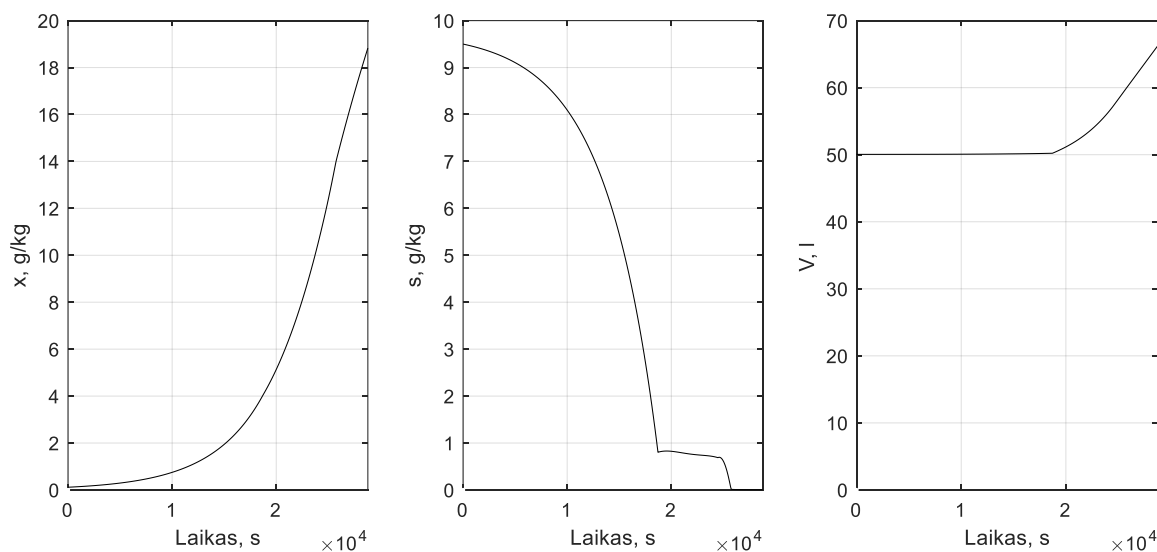
Nagrinėjamo biotechnologinio proceso modelio ištirpusio deguonies koncentracijos neigiamojo grįžtamojo ryšio valdymo sistema naudojant adaptyvų MFA valdymą realizuota Matlab programiniame kode, kuris pridėtas prieduose. Pagrindinėje programoje „MFA\_Simulation“ aprašyti kintamieji ir MFA valdymo vykdymo programa pagal MFA valdymo aprašytą veikimo principą 2.2.1 skyriuje ir schemą pateiktą 2.2.1.1 paveiksle. Funkcijoje „MFA\_procesas“ aprašytas proceso matematinis modelis pateiktas (1) – (12) lygtyse. Pagrindinėje programoje sugeneruojami atsitiktiniai pradiniai neuroninio tinklo svoriai intervale nuo -0,5 iki 0,5 ir vykdomas ciklas intervalais, kas diskretizavimo periodą  $dt=0,2s$ . Proceso trukmė yra 288000s, kas sudaro  $144 \cdot 10^4$  iteracijų. Cikle vykdomas 2.2.1 skyriuje (14) – (20) lygtyse aprašytas valdymo procesas ir apskaičiuojama valdymo proceso kintamojo – užduoto maišyklės sūkių skaičiaus  $N_{set}$  vertė. Apskaičiavus  $N_{set}$  parametro vertę cikle iškviečiama „ode15s“ funkcija, kuri apsprendžia modelio (1) – (12) diferencialines lygtis pagal proceso modelio funkciją „MFA\_procesas“.

### 3. Tyrimo rezultatų dalis

Šiame skyriuje pateikiami ir analizuojami gauti tyrimų rezultatai biotechnologinio proceso bioreaktoriuje ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti. Matlab ir Matlab/Simulink programinėje įrangoje sukurta ištirpusio deguonies valdymo sistema su MFA adaptyviu, neurovaldikliu pagrįstu valdymu, nenaudojant modelio. Atlikti tyrimai ištirpusio deguonies koncentracijos nustatytai vertei sekti ir palaikyti. Taip pat, tiriama sistemos reakcija į nustatytos vertės pokyčius bei proceso trikdį. Be to, atliekamas paminėtos MFA adaptyvaus valdymo sistemos veikimo palyginimas su PI tipo reguliatoriaus valdymo sistema.

#### 3.1. Biotechnologinio proceso imitacinis modeliavimas

Pradžioje, vadovaujantis matematinėmis lygtimis (1) – (12) aprašytas proceso modelis imituojamas Matlab programinėje įrangoje. 3.1.1 paveiksle pateikiami (1) – (3) lygtimis aprašyti biomasės koncentracijos –  $x$ , substrato koncentracijos –  $s$  ir kultūros tūrio –  $V$  kitimo grafikai. Iš proceso biomasės koncentracijos –  $x$  grafiko matome biomasės koncentracijos augimą viso proceso metu iki 17,3 g/kg su spartesniu augimu nuo 18000 sekundžių. Substrato koncentracija –  $s$  nuo pradinės vertės  $s(0)=9,5$  g/kg per 18000 sekundžių mažėja netiesiškai bet pastoviai ir sumažėja iki 0,8 g/kg, nuo 18000 sekundės iki 25000 sekundžių substrato koncentracija mažėja nežymiai, o nuo 25000 sekundžių pastebimas staigus sumažėjimas iki 0 g/kg. Tūris –  $V$  apie 18000 sekundžių laikosi pastovus, o po to pradeda didėti ir iki proceso pabaigos per 28800 sekundžių pasiekia apie 64 litrus.

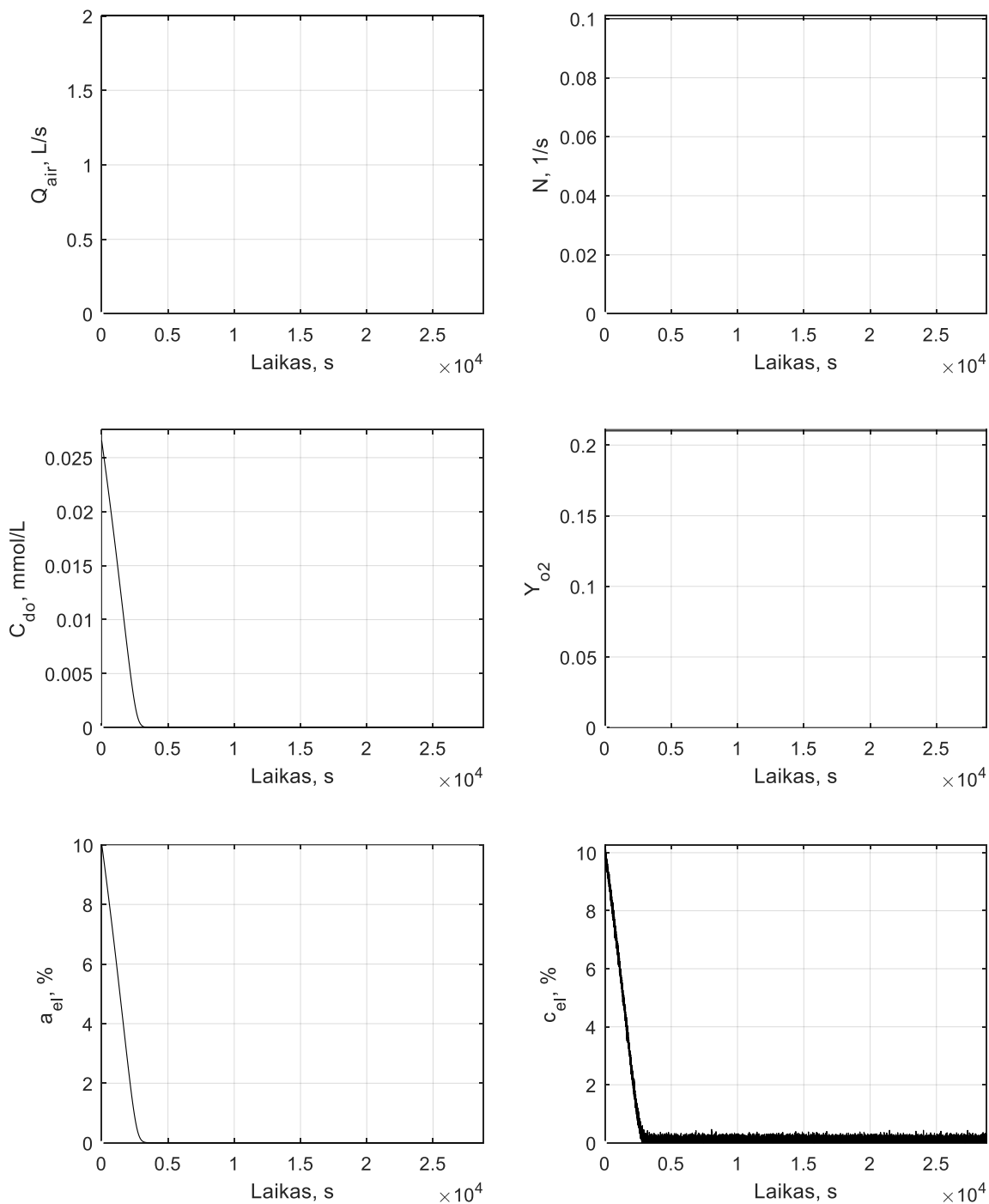


**3.1.1 pav.** Biotechnologinio proceso biomasės koncentracijos -  $x$ , substrato koncentracijos –  $s$ , Bakterijų terpės tūrio -  $V$  kitimo grafikai

Proceso modelio (7) – (12) išraiškų laikinės charakteristikos pateiktos 3.1.2 paveiksle. Šiame paveiksle atvaizduojami oro tiekimo srauto  $Q_{\text{air}}$ , maišyklės sūkių  $N$ , ištirpusio deguonies koncentracijos  $c_{\text{do}}$ , deguonies dalies išmetamuose dujose  $y_{\text{O}_2}$ , pagalbinio kintamojo  $a_{\text{el}}$  ir ištirpusio deguonies matavimo elektrodo signalo  $c_{\text{el}}$  grafikai.

Tuo atveju, kai sistemoje nėra valdymo ir grįžtamojo ryšio, aeravimo srautas  $Q_{\text{air}} = 2$  L/s, maišyklės sūkliai nekintantys, pradinė ištirpusio deguonies koncentracija (absolutiniais vienetais)  $c_{\text{do}}$  nuo pradinės 0,0266 mmol/L staigiai beveik tiesiškai sumažėja praktiškai iki 0 mmol/L per 3600

sekundžių. Išmetimo dujų deguonies dalis  $Y_{O_2}$  visą procesą beveik nekinta nuo pradinės vertės 0,209. O ištirpusio deguonies koncentracijos matavimo elektrodo  $c_{el}$  signalas nuo pradinės 10% ištirpusio deguonies koncentracijos nukrenta beveik iki 0%. Pagal 3.1.1 paveikslą charakteristikas matyti, kad ištirpusio deguonies koncentracija sumažėja tiesiškai iki artimos 0% , apytiksliai per aštuntąją dalį proceso trukmės, kas atitinka 3600s arba pirmą proceso vykdymo valandą.



**3.1.2 pav.** Biotechnologinio proceso grafikai.  $Q_{air}$  – aeravimo srautas,  $N$  – maišyklės sūkliai,  $c_{do}$  – ištirpusi deguonies koncentracija absoliutiniais vienetais,  $y_{o_2}$  - Išmetimo dujų deguonies dalis,  $c_{el}$  – ištirpusio deguonies koncentracija iš matavimo elektrodo signalo.



### 3.2. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos imitacinis modeliavimas

Biotechnologiniam procesui, kuris apibūdintas (1)-(12) išraiškomis, realizuojamas ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas, neigiamo grįžtamojo ryšio valdymo sistema, kurios schema pateikta 2.2.1 paveiksle. Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas atliekamas sukurtu MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio, ir PI pastovių parametrų reguliatoriumi ir atliekamas šių valdymo sistemų palyginimas.

#### 3.2.1. Ištirpusio deguonies koncentracijos nustatytos vertės palaikymo reguliavimas MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio

Atliktas neigiamo grįžtamojo ryšio su MFA adaptyviu valdymu, pagrįstu neurovaldikliu, nenaudojant modelio, sukurtos sistemos imitacinis modeliavimas. Ši valdymo sistema gali būti derinama keičiant  $\eta$  ir  $K_c$  derinimo parametrus, kurie skirti neuroninio tinklo svorio koeficientų  $w_{ij}$  ir  $h_i$  apskaičiavimui (19) ir (20) išraiškose. Derinimo parametrai ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti parinkti bandymų ir klaidų metodu siekiant stabilaus sistemos veikimo ir pateikti 3.2.1.1 lentelėje.

##### 3.2.1.1 lentelė. MFA valdymo derinimo parametrų vertės

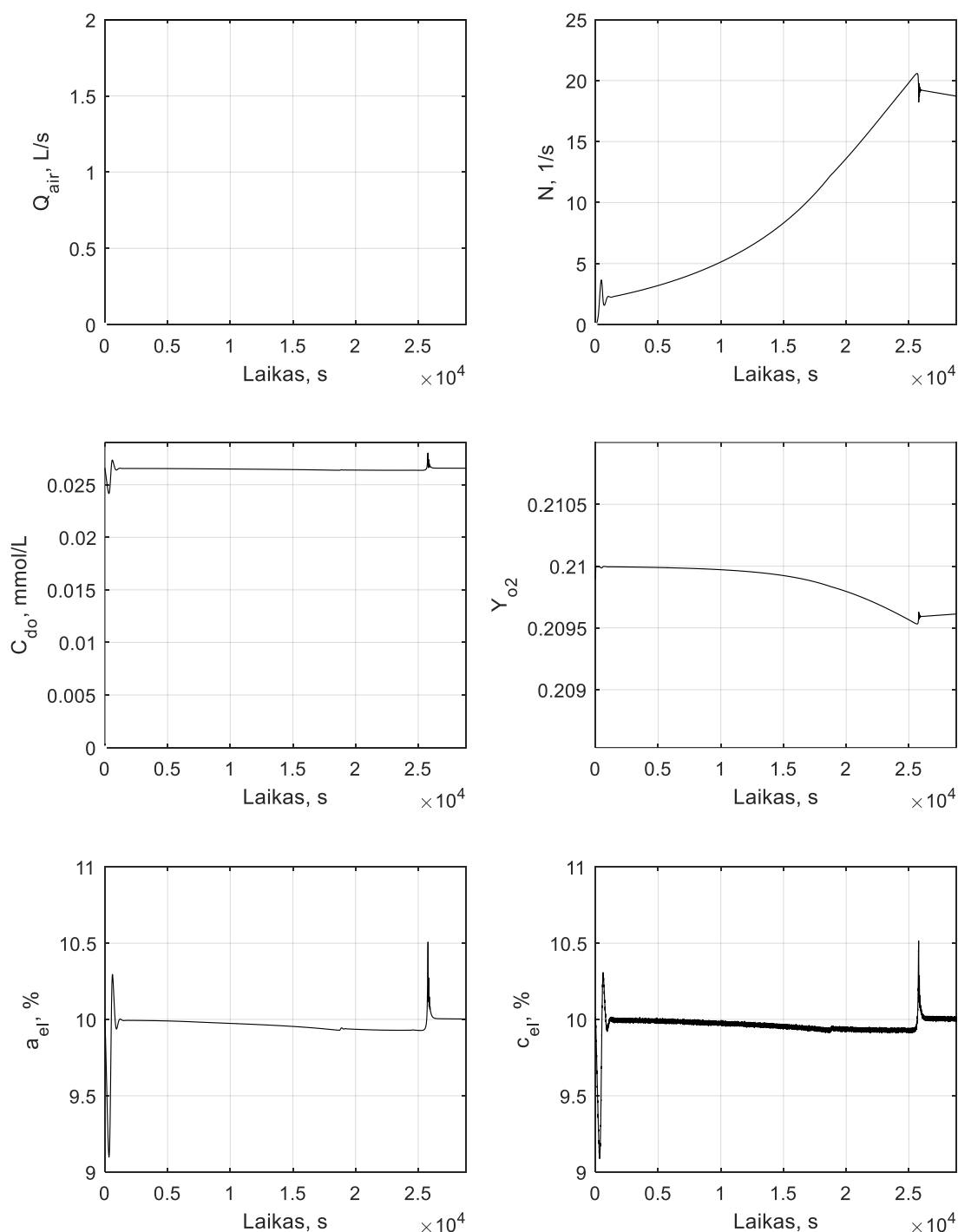
Parametras	Vertė
$\eta$	0,01
$K_c$	0,3

Realizavus sistemą su MFA valdymu atliktas ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo imitavimas. Užduota ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertė parinkta kaip ir pradinė  $c_{el} = 10\%$ . Pavaizduotos proceso modelio (7) – (12) išraiškų laikinės charakteristikos 3.2.1.1 paveiksle. Šiame paveiksle atvaizduojami oro tiekimo srauto  $Q_{air}$ , maišyklės sūkių  $N$ , ištirpusio deguonies koncentracijos  $c_{do}$ , deguonies dalies išmetamuose dujose  $y_{O_2}$ , pagalbinio kintamojo  $a_{el}$  ir ištirpusio deguonies matavimo elektrodo signalo  $c_{el}$  grafikai.

Aeravimo srautas  $Q_{air}$  sistemoje nekinta ir palaikomas pastovus 2 L/s. Pastebimas nežymus maišyklės sūkių svyravimas iki 1300 sekundžių, iš pradžių staigiai kylant iki 3,6 ir nusileidžiant iki 1,6 sūkių per sekundę. Apytiksliai nuo 1300 sekundės iki 25 200 sekundžių maišyklės sūčiai netiesiškai tolygiai greitėja iki apie 20 sūkių per sekundę, tada greitis sumažėja pasvyruojant iki 19 sūkių per sekundę. Grafike pastebimi ištirpusios deguonies koncentracijos nuo pradinės vertės 0,0266 mmol/L svyravimai: sumažėja iki 0,025 mmol/L ir padidėja iki 0,027 mmol/L, vėliau palaikoma koncentracija šiek tiek mažėjant apie 0,0266 mmol/L ir ties 25200 sekundes matomas padidėjimas iki 0,028 mmol/L ir sumažėjimas iki 0,0266 mmol/L. Deguonies dalis išmetamuose dujose  $y_{O_2}$  nuo pradinės vertės 0,2099 sparčiai pakyla iki 0,21 ir netiesiškai pastoviai 25200 sekundžių mažėja iki 0,2095, tada šokteli iki 0,2096 ir nežymiai susvyravus padidėja iki 28000s. Ištirpusio deguonies koncentracijos signalas, išmatuotas ištirpusio deguonies elektrodo,  $c_{el}$ , nuo pradinės 10% vertės svyruoja: krenta iki 9,1% per 330 sekundžių, tada kyla iki 10,3 % ties 600 sekundžių, tada nukrenta iki 9,94 % ir ties 1800 sekundžių stabilizuojasi iki 9,994% kas beveik atitinka nuostato 10% vertę ir iki 25400 sekundžių nukrenta iki 9,93% ištirpusio deguonies koncentracijos, tada sparčiau šuoliškai padidėja iki 10,5% koncentracijos ir nusileidžia iki 10%.

Analizuojant 3.2.1.1 paveikslo grafikus pastebėta, jog pradžioje įvykus švytavimams per 25200 sekundžių ištirpusio deguonies koncentracija linkusi palaikyti nuostato vertę šiek tiek mažėjant nuo jos. O ties 25780 sekundžių pastebimas staigus padidėjimas ir po to valdymas šį nuokrypį pašalina.

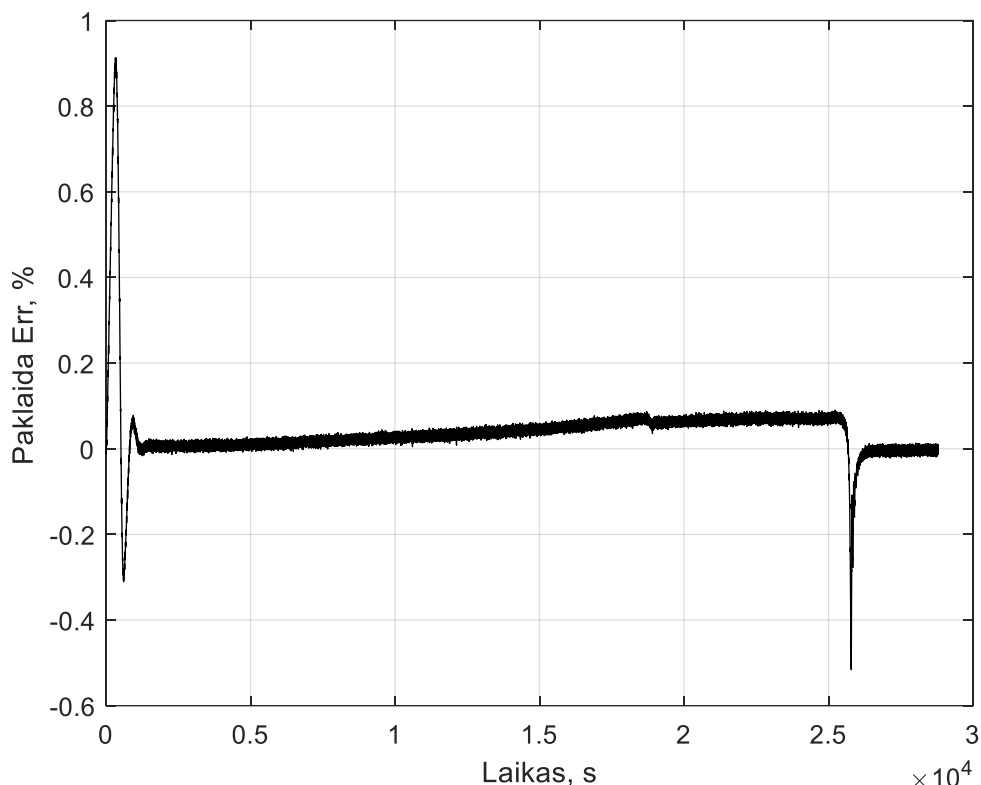
Tokia ištirpusio deguonies koncentracijos nestabilumas įvyksta dėl deguonies suvartojimo greičio OUR, kuriuo grafikas pateiktas 2.3.3 paveiksle, staigaus sumažėjimo.



**3.2.1.1 pav.** Biotechnologinio proceso grafikai su MFA valdymu.  $Q_{\text{air}}$  – aeravimo srautas,  $N$  – maišyklės sūkliai,  $c_{\text{do}}$  – ištirpusi deguonies koncentracija absoliutiniais vienetais,  $y_{\text{o}_2}$  - Išmetimo dujų deguonies dalis, cel – ištirpusio deguonies koncentracija iš matavimo elektrodo signalo.

Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos su MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio, paklaidos grafikas pateiktas 3.2.1.2 paveiksle. Pradžioje grafike matomi paklaidos signalo svyravimai. Ties 1300s svyravimai baigiasi ir proceso valdomojo kintamojo ištirpusio deguonies koncentracijos signalas laikai bėgant tolsta nuo nustatytos vertės ir ties 25000 sekundžių paklaida siekia +0,09%, kas reiškia, jog šiuo laiko momentu ištirpusio deguonies koncentracija yra 0,09%

mažesnė už nuostato  $DOC_{set} = 10\%$  vertę. Ties 25800s paklaida  $err = -0,5\%$  ir iš karto paklaida sumažėja iki 0%.



**3.2.1.2 pav.** Paklaidos tarp 10% užduotos ištirpusio deguonies koncentracijos vertės ir ištirpusio deguonies elektrodo signalo  $c_{el}$  grafikas.

### 3.2.2. Nustatytos pastovios vertės valdymo MFA adaptyviu valdymu, nenaudojant modelio, ir PI reguliatoriumi palyginimas

Atliktas PI reguliatoriaus valdymo ir pagrįsto neurovaldikliu MFA valdymo tyrimas esant pastoviai užduotai ištirpusio deguonies koncentracijos nustatytai vertei 10%. Visą proceso trukmę ištirpusio deguonies koncentracijos matavimo elektrodo vertė  $c_{el}$  lyginama su užduota  $DOC_{set}=10\%$  verte. Kadangi, pradinė  $c_{el}$  parametro vertė lygi 10%, tai abiejų tipų valdymo sistemos pradeda darbą su 0% paklaida. Ištirpusio deguonies koncentracijos grafikas pateiktas 3.2.2.1 paveiksle.

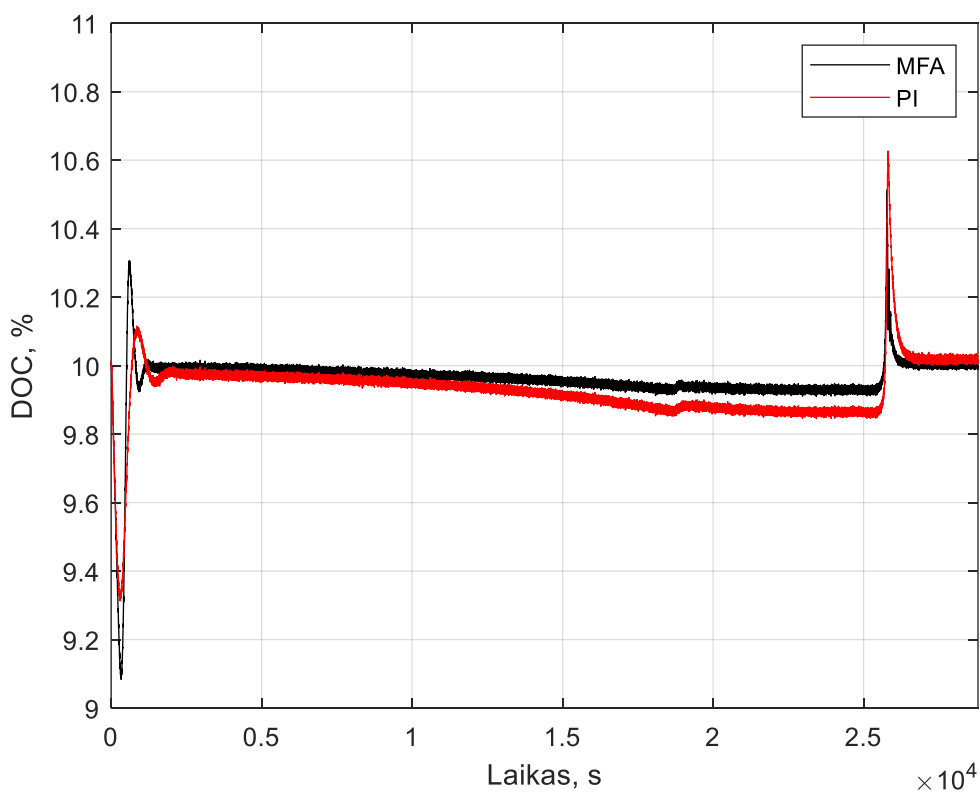
Pradžioje matome, kad tiek PI, tiek MFA valdymu reguliuojama ištirpusio deguonies koncentracija svyruoja pradedant sparčiu sumažėjimu. Esant MFA valdymui koncentracija krenta iki 9,1%, tada pakyla iki 10,3% – vyksta svyravimas, kuris baigiasi ties kažkur 1200 sekunde. Proceso pradžioje MFA valdymo sistemoje vyksta ištirpusio deguonies koncentracijos svyravimai nuo 9,1% iki 10,3%, kurie stabilizuojasi per 1200 sekundes. Valdymo sistemoje su PI reguliatoriumi proceso pradžioje svyravimas mažesnis negu MFA valdymo ir svyruoja nuo 9,3% iki 10,1% pradedant sparčiu sumažėjimu ir kol stabilizuojasi svyravimai užtrunka apie 2000 sekundžių. Toliau mažėja koncentracija iki 25400 sekundės ir per šį laiką MFA valdymu reguliuojama ištirpusio deguonies koncentracija sumažėja iki 9,92%, o PI valdymo iki 9,86%. Tada ties 25600 s vyksta šuolinis DOC vertės padidėjimas iki 10,63% PI ir 10,5% MFA valdymo. Šis šuolinis ištirpusio deguonies koncentracijos padidėjimas MFA valdymu iki nuostato 10% vertės sumažinamas apytiksliai per 600 sekundžių, o PI - apytiksliai per 800 sekundžių. Ties 25600 sekunde vykstantis ištirpusio deguonies

koncentracijos šuolis įvyksta dėl staigaus šuolinio deguonies vartojimo greičio OUR sumažėjimo, ir valdymo sistemos tada turi atlikti veiksmus, jog šią vertę sumažintų.

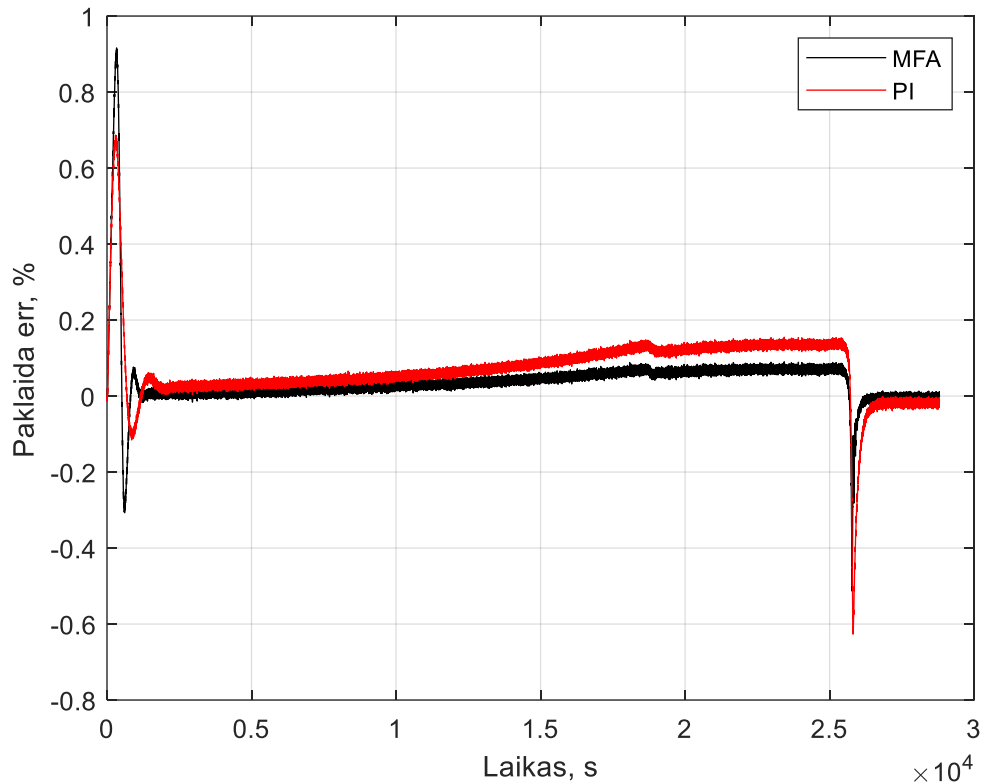
Panašios tendencijos pastebimos ir paklaidos tarp užduotos vertės  $DOC_{set} = 10\%$  ir valdomojo kintamojo  $c_{el}$  vertės. Paklaidos kitimo grafikas pavaizduotas 3.2.2.2 paveiksle. Proceso pradžioje vyksta ištirpusio deguonies koncentracijos svyravimai, todėl paklaida padidėja ir svyruoja nuo  $-0,3\%$  iki  $+0,8\%$  MFA valdymo sistemoje ir nuo  $-0,11\%$  iki  $+0,67\%$  valdymo sistemoje su PI reguliatoriumi kol stabilizuojasi. Toliau vykstant procesui, paklaida didėja pliuso kryptimi, kas reiškia, jog yra ištirpusio deguonies koncentracijos sumažėjimas ir idealiai nėra išlaikomas tiesiškai užduotas lygis. Laikui bėgant paklaida didėja ir ties  $25600s$  pasiekiamos  $0,14\%$  PI valdymo ir  $0,07\%$  MFA, neurovaldikliu pagrįsto, valdymo paklaidos. Po to, vyksta staigus paklaidos šuolis dėl vykstančio OUR staigaus sumažėjimo, po kurio grįžtama iki artimos  $0\%$  paklaidos. Vidutinės absoliutinės paklaidos pastovios  $10\%$  nuostato vertės palaikymui pateiktos 3.2.2.1 lentelėje. MFA adaptyvus, neurovaldikliu pagrįstas valdymas pastovią nuostato vertę palaiko geriau nei PI reguliatorius.

**3.2.2.1 lentelė.** PI regulatoriaus ir MFA valdymo sistemų vidutinės absoliutinės paklaidos esant pastoviam ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatui  $DOC_{set} = 10\%$

Valdymo sistema	Vidutinė absoliutinė paklaida MAE, kai $DOC_{set}=10\%$
PI	0,0842
MFA	0,0474



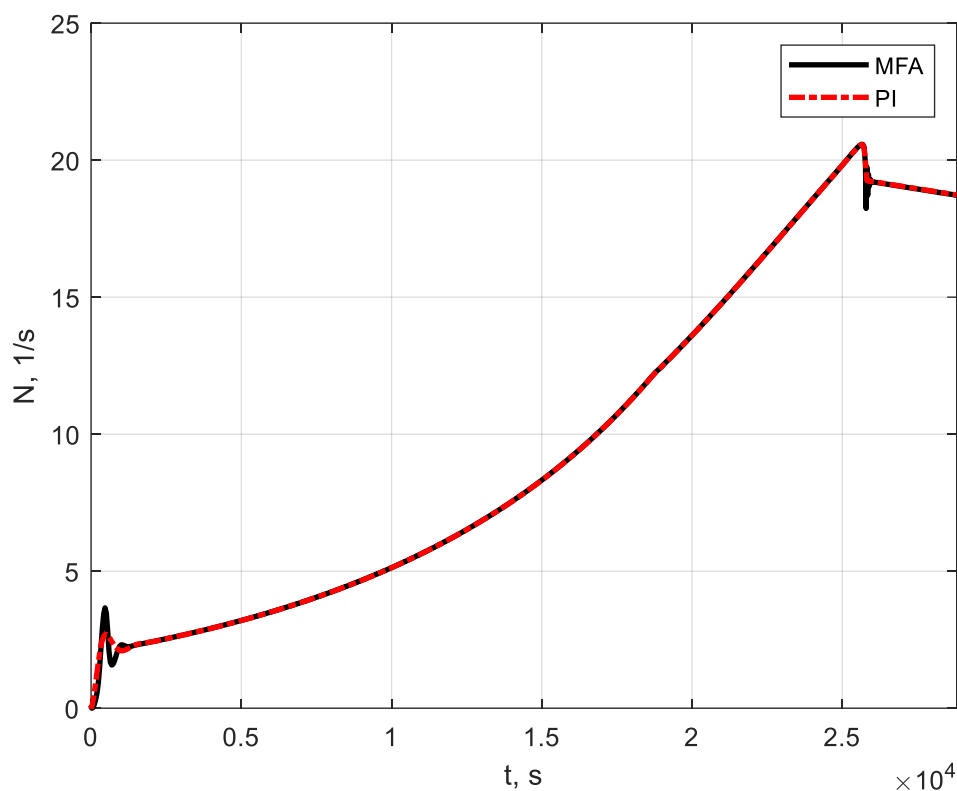
**3.2.2.1 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos grafikas, kai nuostato vertė pastovi,  $DOC_{set}=10\%$



**3.2.2.2 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas, kai nuostato vertė pastovi,  $DOC_{set}=10\%$

Maišyklės sūkių greičio  $N$  kitimo grafikas pateiktas 3.2.2.3 paveiksle. Pradžioje pastebimas ženklus sūkių padidėjimas kol stabilizuojasi iki 2,3 sūkių per sekundę ties 1300 sekundžių. Abiejų valdymo sistemų reguliuojami maišyklių sūkių signalai stabilizuojasi panašiu laiku ties 1300 sekundžių, tik esant MFA valdymui matomi didesni svyravimai iki stabilizavimosi. Maišyklės sūkiams stabilizavusis iki 1300 s, toliau sūkių greitis tolygiai netiesiškai didėja ir iki 25600 sekundžių pasiekama 20,5 sūkių per sekundę, ir po to sumažėja iki 19,2.

Šis sumažėjimas nuo 20,5 iki 19,2 sūkių per sekundę PI valdymu užfiksuotas tolygesnis nei naudojant MFA valdymą. Vėliau sūčiai tolygiai mažėja iki 18,7 per sekundę ties 28800 proceso vykdymo sekunde.



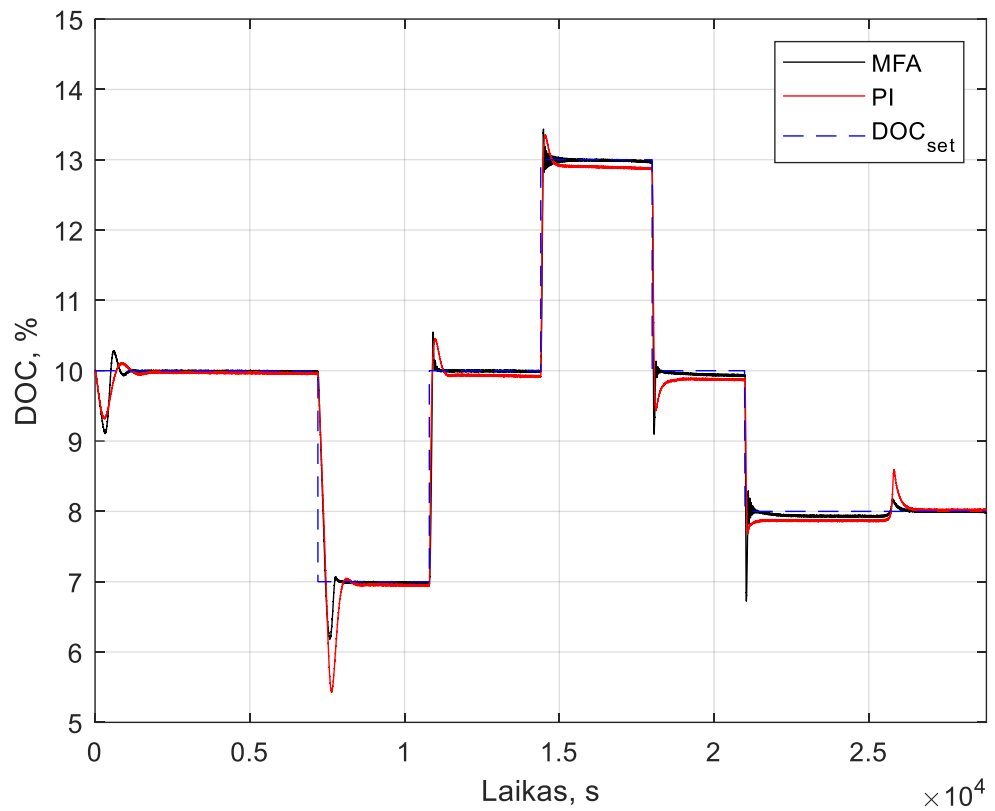
**3.2.2.3 pav.** Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI reguliatoriaus valdymo sistemoms esant trikdžio poveikiui – aeravimo srauto pokyčiams

### 3.2.3. Valdymo sistemos reakcija į nuostato pokyčius

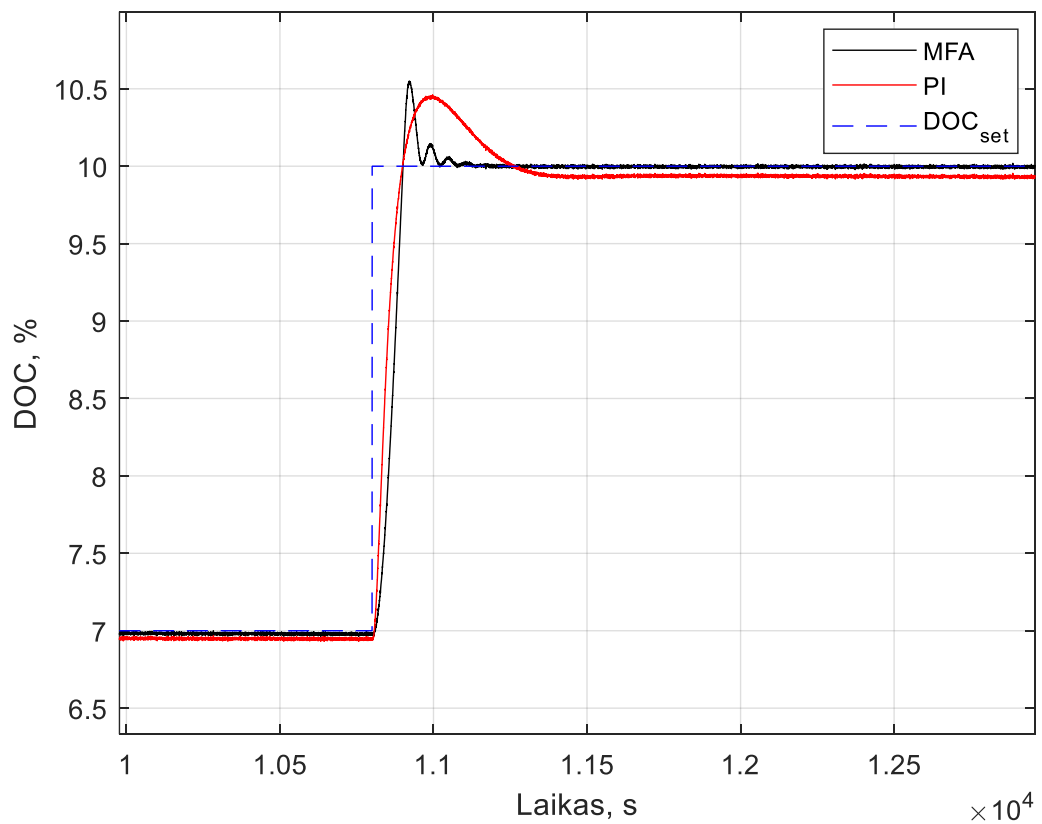
Atliekami nustatytos ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertės pokyčiai proceso metu ir stebima sistemų reakcija. Ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato verčių  $DOC_{set}$  pokyčiai pateikti 3.2.3.1 lentelėje. Pagal šiuos  $DOC_{set}$  vertės pokyčius gauta valdymo sistemos reakcija pateikta 3.2.3.1 paveiksle, o paklaidos kitimo grafikas pateiktas 3.2.3.3 paveiksle. Iš ištirpusio deguonies koncentracijos ir paklaidos grafikų pastebima, jog pirmame nuostato vertės sumažėjime  $DOC_{set} = 7\%$  MFA valdymo sistema beveik dvigubai greičiau ir su mažesne paklaida sureagoja į  $DOC_{set}$  pokytį nei PI pastovių parametrų reguliatoriaus valdymo sistema. Į kitus nuostato vertės pokyčius MFA valdymas sureagoja trumpai trunkančiais švytavimais, tačiau nuostato vertę palaiko artimesnę nuostatui nei PI reguliatorius. 3.2.3.2 paveiksle atvaizduojamas priartintas pereinamasis procesas  $DOC_{set}$  vertei pasikeičiant iš 7% į 10%. Iš priartintų kreivių matyti, jog MFA adaptyvaus, neurovaldikliu pagrįsto, valdymo reguliuojamas ištirpusios deguonies koncentracijos signalas greičiau ir tiksliau stabilizuojasi įvykus minėtiems pokyčiams nei PI reguliatoriaus.

**3.2.3.1 lentelė.** Ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertės laiko intervalais

Ištirpusio deguonies koncentracijos vertė $DOC_{set}$ , %	Laiko intervalai, s
10 %	Nuo 0 s iki 7200 s
7 %	Nuo 7201 s iki 10800 s
10 %	Nuo 10801 s iki 14400 s
13 %	Nuo 14401 s iki 18000 s
10 %	Nuo 18001 s iki 21000 s
8 %	Nuo 21001 s iki 28800 s



**3.2.3.1 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymas vykstant nuostato vertės DOC<sub>set</sub> pokyčiams

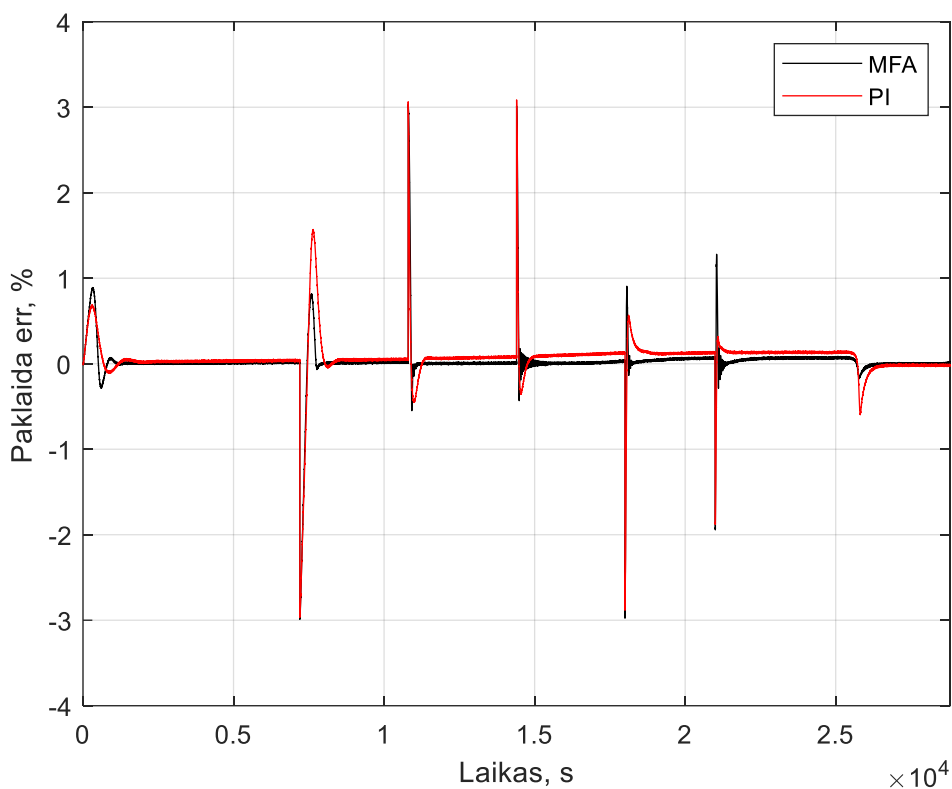


**3.2.3.2 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo reakcijos į DOC<sub>set</sub> pokyčio šuolinį padidėjimą

Iš 3.2.3.3 paveiksle pateikto paklaidos grafiko matomos ištirpusio deguonies valdymo paklaidos laikinės priklausomybės MFA adaptyvaus ir PI pastovių parametrų reguliatoriaus valdymo sistemų. Pagal paklaidos grafikus matyti, jog įvykus nuostato vertės pakeitimui paklaida padidėja iki artimos nuostato pokyčiui reikšmės. Iš grafiko pastebima, jog esant MFA valdymo sistemai paklaida mažesnė, kas taip pat paaiškėja ir apskaičiuavus vidutinę absoliutinę paklaidą, kai PI reguliatoriaus valdymo sistemos vidutinė absoliutinė paklaida MAE=0,0705, o MFA neurovaldikliu pagrįstos valdymo sistemos MAE=0,1315.

**3.2.3.1 lentelė.** PI reguliatoriaus ir MFA valdymo sistemų vidutinės absoliutinės paklaidos esant pastoviam ištirpusio deguonies koncentracijos nuostatui  $DOC_{set} = 10\%$

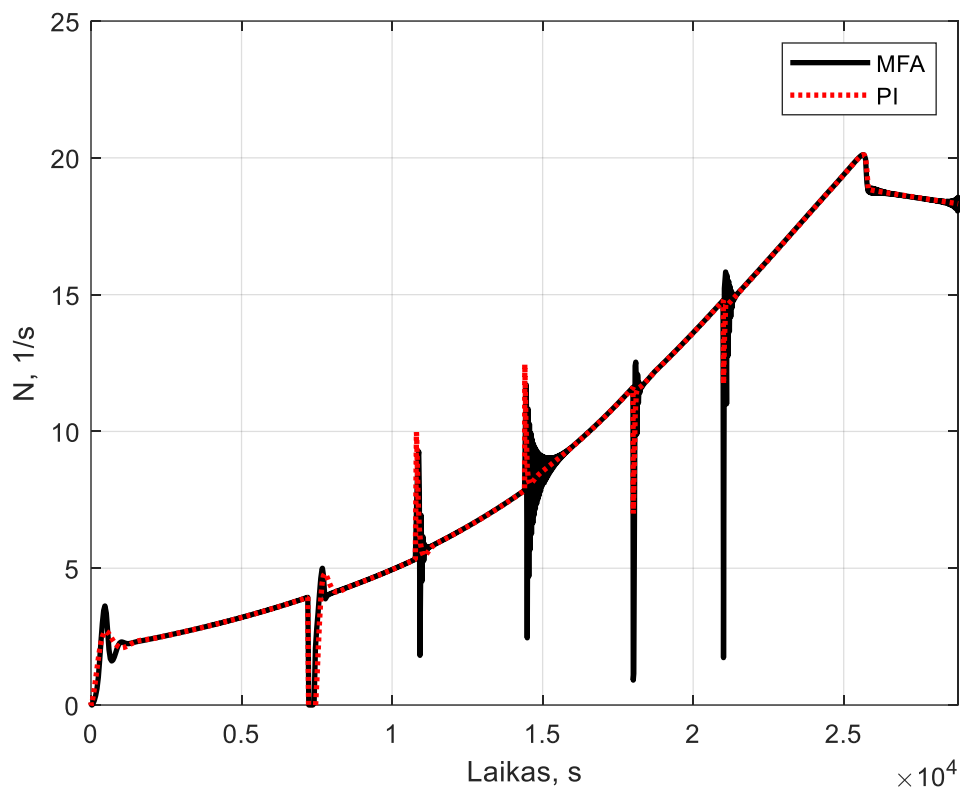
Valdymo sistema	Vidutinė absoliutinė paklaida MAE, vykstant $DOC_{set}$ pokyčiams
PI	0,1315
MFA	0,0705



**3.2.3.3 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas vykstant nuostato vertės  $DOC_{set}$  pokyčiams.



3.2.3.4 paveiksle pateikta maišyklės sūkių greičio kitimo laikinė charakteristika vykstant ištirpusio deguonies nustatytos užduotos vertės pokyčiams. Pastebima MFA valdymo didesnės amplitudės reakcija su trumpais švytavimais įvykus nuostato vertės pakitimams. Tuo tarpu, PI reguliatoriaus valdymo sistemos maišyklės sūkių greičio svyravimų, įvykus  $DOC_{set}$  nuostato pokyčiui, nepastebėta.



**3.2.3.4 pav.** Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI reguliatoriaus valdymo sistemoms esant ištirpusio deguonies nuostato vertės pasikeitimas

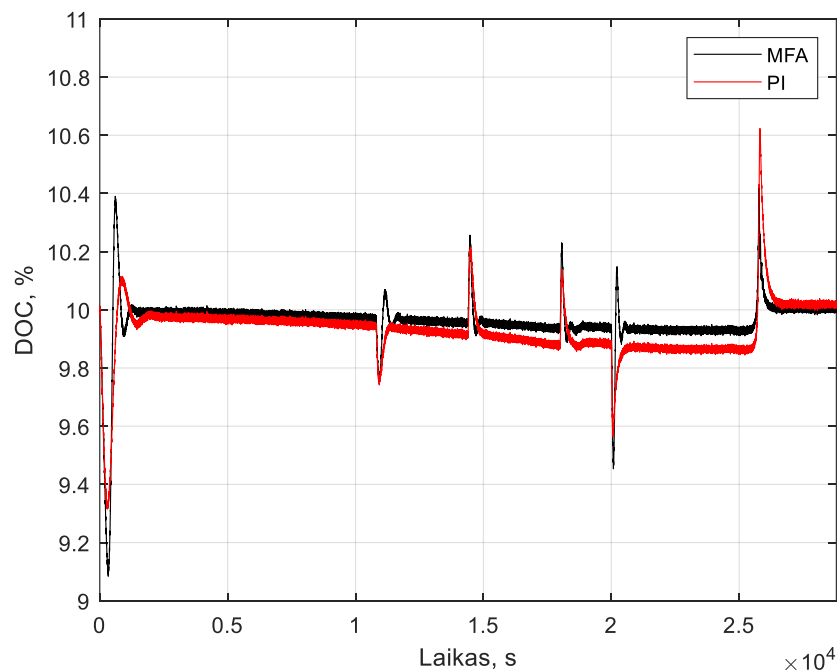
### 3.2.4. Valdymo sistemos reakcija į trikdį

Ištirpusio deguonies koncentracijos valdymo sistemos su MFA adaptyviu, neurovaldikliu pagrįstu ir PI valdymu palygintos kaip reaguoja į trikdžio poveikį. Kaip trikdys sistemai panaudoti aeravimo srauto greičio pokyčiai, o ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertė nekinta ir yra pastovi  $DOC_{set}=10\%$ . Aeravimo srauto kitimo grafikas pavaizduojamas 3.2.4.1 paveiksle. Trikdžio reakcija atliekama ties 10800 s aeravimo srautą  $Q_{air}$  sumažinus šuoliu nuo 2 L/s iki 1 L/s, trikdančio poveikio trukmė 3600 s ir ties 14400 s aeravimo srautas šuoliu grįžta iki 2 L/s. Ties 18000s atliekamas dar vienas trikdantysis aeravimo srauto poveikis ir  $Q_{air}$  vertė pakeliama iki 3 L/s ir ties 20000 s šuoliškai grąžinama iki 2L/s.

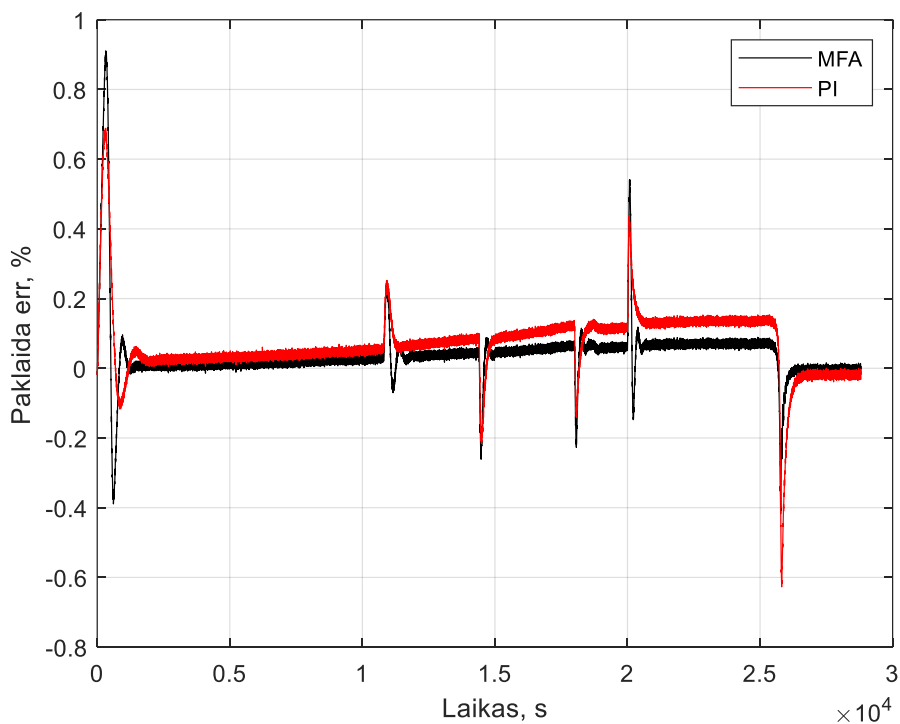


**3.2.4.1 lentelė.** Vidutinės absoliutinės paklaidos trikdžio poveikiui šalinti ištirpusio deguonies valdymo sistemos PI ir MFA valdymo palyginimas

Valdymo sistema	Vidutinė absoliutinė paklaida MAE trikdžio poveikiui mažinti
PI	0,0871
MFA	0,0521



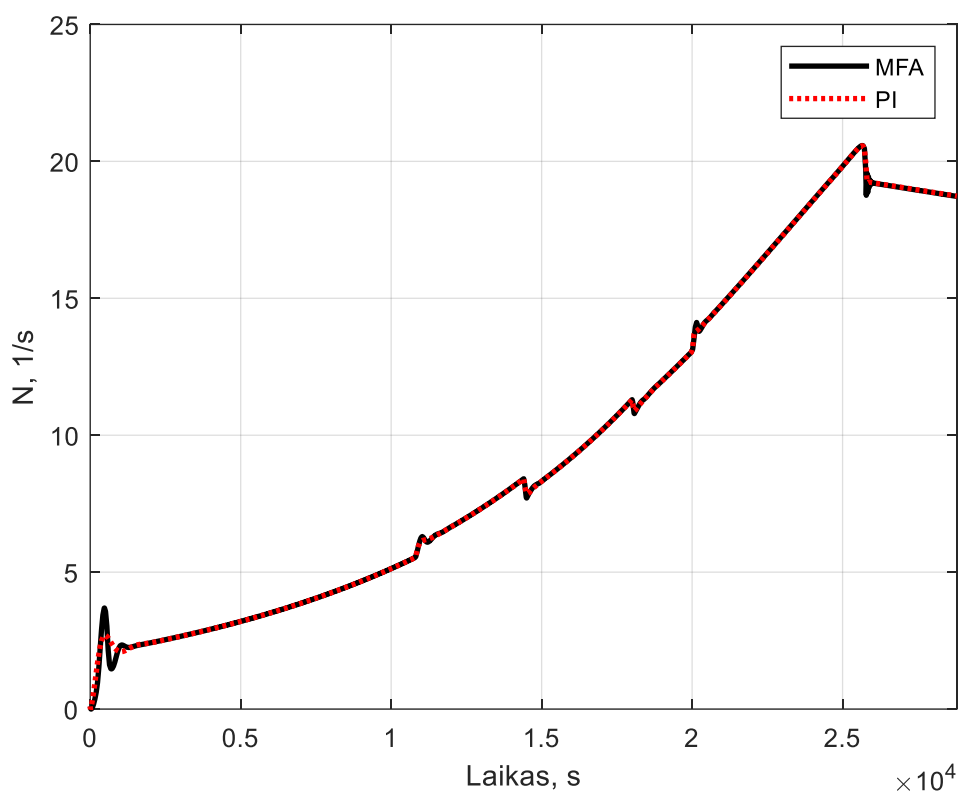
**3.2.4.2 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos grafikas, esant trikdžio poveikiui - aeravimo srauto pokyčiams.



**3.2.4.3 pav.** Ištirpusio deguonies koncentracijos paklaidos tarp užduotos vertės ir valdomojo kintamojo kitimo grafikas esant trikdžiui – aeravimo srauto pakitimams

Taip pat, 3.2.4.4 paveiksle pateiktas MFA neuroniniu tinklu pagrįsto ir PI pastovių parametru valdymo valdančiojo poveikio – maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas esant trikdžiui. Pastebima, jog sūkliai palaikomi panašūs. Šuoliškai sumažėjus aeravimo srautui  $Q_{air}$  nuo 2 L/s iki 1 L/s laikotarpiu nuo 10800 s iki 14400 s matomas maišyklės sukimosi greičio padidėjimas 5%, kaip reakcija į sumažėjusį aeravimo srautą. Į aeravimo  $Q_{air}$  srauto padidėjimą nuo 2 L/s iki 3 L/s valdymo sistemos sureaguoja priešingai – sumažinamas maišyklės sūklių greitis 5%. Lyginant MFA ir PI valdymo sistemas pagal maišyklės sūklių reguliavimą esant trikdžio poveikiui, tai panašiai reaguoja abiejų tipų sistemos. Tačiau, dinaminio pobūdžiu patį pokytį greičiau ir su mažesniais svyravimais įgyvendina PI reguliatorius.

Apibendrinant PI reguliatoriaus ir MFA valdymo sistemų poveikį į trikdį, pastebima, jog valdymo paklaida yra mažesnė MFA valdymo, tačiau PI valdymas greičiau ir su mažesniais svyravimais reaguoja į trikdžio poveikį.



**3.2.4.4 pav.** Maišyklės sukimosi greičio kitimo grafikas MFA ir PI reguliatoriaus valdymo sistemoms esant trikdžio poveikiui – aeravimo srauto pokyčiams

## Išvados

1. Iš atliktos literatūrinės analizės pastebėta, jog ištirpusios deguonies koncentracijai valdyti biotechnologiniuose procesuose efektyvesnis būdas taikyti adaptyvaus valdymo sistemas nei PI reguliatorius, kas buvo nustatyta vertinant absoliutines paklaidas.
2. Pasirinkta naudoti *e. Coli* bakterijų kultivavimo biotechnologinį procesą ištirpusio deguonies koncentracijos valdymui bioreaktoriuje su pamaitinimu. Matematinio modulių aprašytas procesas ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti realizuotas Matlab programiniame kode su adaptyviu, neurovaldikliu pagrįstu valdymu, nenaudojant modelio, ir Matlab/Simulink modelyje su PI pastovių parametrų valdymu.
3. Pasirinkta ištirpusio deguonies koncentracijai valdyti naudoti adaptyvų, neurovaldikliu pagrįstą valdymą, nenaudojant modelio, ir kaip valdantį poveikį naudoti maišyklės sūkių greitį. Todėl sukurta MFA neurovaldikliu pagrįsta adaptyvaus valdymo sistema su dviejų reikšmių užvėlinimu, trimis neuronais paslėptame sluoksnyje ir vienu neuronu išėjimo sluoksnyje. Siekiant stabilaus valdymo MFA valdymo derinimo parametrai parinkti  $\eta=0,01$  ir  $K_c=0,3$ . Valdymo sistema realizuota Matlab programiniame kode ir palyginta su Matlab/Simulink aplinkoje realizuotu PI reguliatoriumi, kurio derinimo parametrai: stiprinimo koeficientas  $K_p = 1,5 \text{ \%}^{-1}\text{s}^{-1}$  ir integravimo laiko pastovioji  $T_i = 160\text{s}$ .
4. Atlikus imitacinį modeliavimą naudojant sukurta MFA adaptyvų valdymą, nenaudojant modelio, pastebėta, jog naudojamo biotechnologinio proceso deguonies suvartojimo greičio OUR šuolinis vertės sumažėjimas ties 25600 sekundžių nuo 0,061 mmol/s iki 0,054 mmol/s daro įtaką ištirpusio deguonies koncentracijai, kuri išauga, ir valdymo sistema turi kompensuoti šį poveikį mažinant maišyklės sūkių skaičių apie 9,5%.
5. Atlikus MFA ir PI reguliatoriaus valdymo sistemų tyrimą esant pastoviai užduoto deguonies koncentracijos nuostato  $\text{DOC}_{\text{set}}=10 \text{ \%}$  vertei pastebėta, jog MFA adaptyvus valdymas ištirpusio deguonies koncentracijos nuostato vertę palaiko geriau – ištirpusio deguonies koncentracija palaikoma artimesnė nekintančiai nuostato vertei nei PI valdymo atveju. Vidutinė absoliutinė paklaida MFA valdymo sistemos mažesnė nei su PI valdymu (vidutinė absoliutinė paklaida gauta su MFA adaptyviu valdymu 0,0474, o su PI valdymu 0,0842).
6. Lyginant ištirpusio deguonies koncentracijos MFA ir PI reguliatoriaus valdymo reakcijas keičiantis nuostato vertei, pastebėta, kad sistemos su MFA adaptyviu valdymu vidutinė absoliutinė paklaida yra mažesnė ( $\text{MAE}=0,0705$ ), nei naudojant sistemą su PI reguliatoriumi ( $\text{MAE} = 0,1315$ ). Analizuojant MFA valdymo sistemos reakciją į nuostato vertės pokytį, pastebimas nedidelis signalo vertės svyravimas prieš stabilizuojantis pastoviai vertei, kai PI reguliatoriaus sistemoje svyravimo nėra.
7. Valdymo sistemų reakcijai į trikdžio poveikį kaip trikdžio signalas panaudotas aeravimo srauto greičio vertės sumažinimas ir padidinimas. Abi valdymo sistemos panašiai reaguoja į trikdį: maišyklės sūkių padidinti 5% pamažėjus aeravimo srautui 1 L/s, o padidėjus 1 L/s aeravimo srautui maišyklės sūkių sumažinti 5%. MFA valdymo sistemos reakcija trikdžiui kompensuoti iš pradžių pasižymi trumpu nestipriu signalo švytavimu, kai PI reguliatoriaus poveikis panašesnis į šuolį be ryškesnių signalo švytavimų. Apskaičiavus vidutinę absoliutinę paklaidą trikdžio poveikio mažinimui MFA neurovaldikliu pagrįsto valdymo  $\text{MAE} = 0,0521$ , o esant PI reguliatoriui  $\text{MAE} = 0,0871$ .
8. Apibendrinant atliktą imitacinį modeliavimą ir tyrimus, galima teigti, kad sukurta MFA valdymas galėtų būti naudojamas ištirpusio deguonies koncentracijos reguliavimui realiuose sistemose.

## Literatūros sąrašas

1. GALVANAUSKAS V., SIMUTIS R., LEVISAUSKAS D. ir URNIEŽIUS R. *Combined Scheme for Basic Control Systems in Industrial Bioreactors*. Kaunas University of Technology, Kaunas LT-51367, Lithuania, 2019, [žiūrėta 2022 m. sausio 05 d.]
2. FRANCIS X. J., and LINKE-HEEP C. *Industrial Biotechnology and Industrial Biotechnology and Biomass Utilisation Biomass Utilisation Prospects and Challenges for the Developing World* [interaktyvus]. UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION Vienna, 2007.
3. TUTORIALS POINT (I) PVT. LTD. *Control Systems – Introduction*. *Tutorialspoint* [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2022 kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: [https://www.tutorialspoint.com/control\\_systems/control\\_systems\\_introduction.htm#](https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_introduction.htm#)
4. GALVANAUSKAS V., SIMUTIS R., LEVISAUSKAS D. ir URNIEŽIUS R. *4. Practical Solutions for Specific Growth Rate Control Systems in Industrial Bioreactors* [interaktyvus]. Department of Automation, Kaunas University of Technology, Kaunas 51367, Lithuania, 2019, [žiūrėta 2022 m. sausio 21 d.]. ISSN 2227-9717. Prieiga per: doi: 10.3390/pr7100693
5. SONNLEITNER B. *Instrumentation of Biotechnological Processes*. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol. 66. 1999.
6. CHRISTIAN J. AND WHITFORD W. *Bioreactor Monitoring, Modeling, and Simulation*. *BioProcess International*. 2006. p. 10 – 17.
7. DOCHAIN Denis. *Automatic Control of Bioprocesses* [Automatique des bioprocédés]. 2 – oji laida. Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2008. ISBN: 978-1-84821-025-7
8. GHASEM D. NAJAFPOUR. *Biochemical Engineering And Biotechnology* [interaktyvus]. Biotechnology Research Lab., Faculty of Chemical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, 2007. ISBN 978-0-444-63357-6. Prieiga per: doi:10.1016/B978-0-444-63357-7-6
9. MANDENIUS Carl-Fredrik ir Bjorkman Mats. *Biomechatronic Design in Biotechnology. A Methodology for Development of Biotechnological Products*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011. ISBN 978-0-470-57334-1
10. MICHENEL T. *Bioreactor Types, Design, Parts, Applications, Limitations* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2022 m. balandžio 12 d.] Prieiga per internetą: <https://bbf.lt/YFMee>.
11. BAJPAI P. *General background and introduction* In: *Biotechnology in the Chemical Industry* [interaktyvus]. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-818402-8. Prieiga per: doi:10.1016/B978-0-12-818402-8.00001-X
12. VANCE J. VANDOREN. *Techniques for Adaptive Control*. Elsevier Science (USA), 2003. [žiūrėta 2022 m. vasario 20 d.]. ISBN 0-7506-7495-4.
13. LEVISAUSKAS, D. *Simple Control Systems for Set-Point Control of Dissolved Oxygen Concentration in Batch Fermentation Processes* [interaktyvus]. Kaunas University of Technology, Kaunas LT-51367, Lithuania, 2019. ISBN978-88-95608-73-0
14. LEVIŠAUSKAS, GALVANAUSKAS V., HENRICH S., WILHELM K., VOLK N., LUBBERT A. *Model-based optimization of viral capsid protein production in fed-batch culture of recombinant* [interaktyvus]. Springer-Verlag, 2002 [žiūrėta 2022 m. kovo 01 d.]. ISSN 1615-7591. Prieiga per: doi: 10.1007/s00449-002-0305-x

15. GALVANAUSKAS A., SIMUTIS R., VAITKUS V. *Adaptive Control of Biomass Specific Growth Rate in Fed-Batch Biotechnological Processes. A Comparative Study*. Kaunas University of Technology, [interaktyvus]. 2019. 7(11). [žiūrėta 2022 m. gegužės 13 d.]. ISSN 22279717. Prieiga per: doi: 10.3390/pr7110810
16. CARAMIHAI M. AND SEVERIN I. *Bioprocess Modeling and Control. Biomass Now – Sustainable Growth and Use*. University POLITEHNICA Bucharest, Romania. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2022 m. vasario 27 d.]. Prieiga per: doi: 10.5772/55362
17. PÉREZ-CORREA R. AND AGOSIN E. *Instrumentation And Control Of Bioprocesses. Department of Chemical and Bioprocess Engineering*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009., p.73-109.
18. TAKIALDDIN, AL SMADI, AL-AGHA, OSMAN IBRAHIM, ALSMADI, KHALID ADNAN. *Overview of model free adaptive (MFA) control technology. IAES International Journal of Artificial Intelligence* [interaktyvus]. 2018. 165-169, 7(4) [žiūrėta 2022 m. balandžio 14 d.]. ISSN 22528938. Prieiga per: doi: 10.11591/ijai.v7.i4.pp165-169 Techniques for Adaptive Control – knyga 145-155 psl.
19. TUTORIALS POINT (I) PVT. LTD. *Control Systems – Introduction. Tutorialspoint* [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2022 kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: [https://www.tutorialspoint.com/control\\_systems/control\\_systems\\_introduction.htm#](https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_introduction.htm#)
20. CHITRA, M. et al. *Dissolved Oxygen Control of Batch Bioreactor using Model Reference Adaptive Control scheme. Science Direct, IFAC-PapersOnLine* [interaktyvus]. 51-4 (2018) 13 – 18 [žiūrėta 2022 m. gegužės 10 d.]. ISSN 24058963. Prieiga per: doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.008
21. LEVIŠAUSKAS D., SIMUTIS R., GALVANAUSKAS V. *Adaptive set-point control system for microbial cultivation processes. Nonlinear Analysis: Modelling and Control Vol.21., No. 2.* [interaktyvus]. 2015. 153–165 [žiūrėta 2022 m. balandžio 11 d.]. ISSN 1392-5113. Prieiga per: doi: 10.15388/NA.2016.2.1
22. CHENG, G. S. *Model-Free Adaptive (MFA) Control, 2005*. In LIPTAK, B.G, *Instrument Engineers' Handbook, Volume One. Process Measurement and Analysis*. CRC Press, 2006, ISBN 9780429127380
23. BUTKUS M., LEVIŠAUSKAS D., GALVANAUSKAS V. *Simple gain-scheduled control system for dissolved oxygen control in bioreactors. Processes*, [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022 m. balandžio 20 d.]. ISSN 22279717 Prieiga per: doi: 10.3390/pr9091493

## Priedai

### 1 priedas. Pagrindinės „MFA\_Simulation“ Matlab programos kodas

```
clc;
clear all;
close all;
global q q1 OUR mumax time_ind sf ki T Tref
global alfa ks Yxs m Tpx km kimu kmu mox Yox
global mu F DOC_set Qair_set Nset H Kc Tell Tel2 Tq Tn V alpha beta epsilon
global gama Nimmol Qair_0 N_0 cdo_0 yo2_0 ael_0 cel_0 err errvec errvektorius E
e_t_norm2 N
global mox_bandom Yox_bandom

%-----Modelio parametrai-----
sf=151; %substrato koncentracija pamaitinimo tirpale, [g/kg]
m=0.0242/3600; %biomasės palaikymo koeficientas, [g/g/s]
mumax=0.737/3600; %maksimalus specifinis biomasės augimo greitis, [1/s]
ks=0.00333; %Monodo konstanta substrato suvartojimui, [g/kg]
Yxs=0.46; %biomasės/substrato išeiga, [g/g]
ki=93.8; %slopinimo konstanta substrato suvartojimui [g/kg]
Tpx=1.495*3600; %atitinkama laiko konstanta, [s]
time_ind=8*3600; %indukcijos laikas, [s]
km=751; %proporcingumo koeficientas, [U/g]
kimu=0.0174/3600; %slopinimo konstanta, [1/s]
alfa=0.0495; %temperatūrinė konstanta, [1/oC]
kmu=0.61/3600; %Monodo konstant, [1/s]
Tref=37; %etaloninė temperatūra, [oC]
Qair_set=2;
H=0.7906; %Henrio konstanta [L/mmol]
Kc=0.00265; %Stiprinimo koeficientas [mmol/L]
Tell=10; %ištirpusio deguonies elektrodo laiko konstanta [s]
Tel2=2; %ištirpusio deguonies elektrodo laiko konstanta [s]
Tq=1; %oro padavimo sistemos laiko konstanta [s]
Tn=1; %maišymo sistemos laiko konstanta [s]
V=45; % [L]
alpha=0.000008;
beta=2.0;
epsilon=0.15;
gama=0.2;
Nimmol=0.0224; %1 mmol dujų tūris [L 1/mmol]
Qair_0=2.0; %nustatyta oro tiekimo srauto vertė [L 1/s]
N_0=0.1; %maišymo greitis [1/s]
cdo_0=0.0266; %ištirpusio deguonies koncentracija absoliučiais
vienetais [mmol/L]
yo2_0=0.2099; %išmetamosiose dujose esanti deguonies dalis
ael_0=10; %tarpinis kintamasis [%]
cel_0=10; %ištirpusio deguonies elektrodo signalas [%]
errvec=[zeros(2,1)];
errvec_normalizuotas=[zeros(2,1)];
DOC_set=[10];
%DOC_set=10; %10% setpoint

eps=1e-6;
options = odeset('RelTol', eps);
dt=0.2;
tspan=[0.0:dt:28800.0]; % Proceso laikas [s]
% [x s px w Qair; N; cdo; yo2; ael; cel ];
c0 = [0.116; 9.5; 0.0; 50.05; 2.0; 0.1; 0.0266; 0.2099; 10; 10]; %
Pradiniai parametrai
```



```

c00=c0; c=c0';

t=tspan(1);
q1=zeros(1,9); % Vector of additonal variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MFA Valdiklis%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
eta=0.01;
Kp=0.3;
nodes_hidden_layer=3; %neuronu kiekis pasleptame sluoksnyje
number_inputs=3; %iejimu skaicius
nodes_output_layer=1; %neuronu kiekis isejimo sluosknyje
NetDef=['HHH---';'L-----'];
wij=rand(nodes_hidden_layer,number_inputs+1)-0.5; %atsitiktiniai wij
pradiniai svoriai nuo -0.5 iki 0.5
hi=rand(nodes_output_layer,nodes_hidden_layer+1)-0.5; %atsitiktiniai hi
pradiniai svoriai nuo -0.5 iki 0.5
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k=1:length(tspan)-1
q=[];
tspan0=tspan(k:k+1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%DOC_set pokyčiai%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if tspan(k)<= 7200
DOC_set(end+1)=10;
end
if tspan(k)> 7200 & tspan(k)<= 10800
DOC_set(end+1)=5;
end
if tspan(k)> 10800 & tspan(k)<= 14400
DOC_set(end+1)=10;
end
if tspan(k)> 14400 & tspan(k)<= 18000
DOC_set(end+1)=15;
end
if tspan(k)> 18000 & tspan(k)<= 21000
DOC_set(end+1)=10;
end

if tspan(k)> 21000
DOC_set(end+1)=8;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%valdiklis%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%err=DOC_set-c00(10);
err=DOC_set(k)-c00(10);
errvec(end+1)=err;

E = [errvec(end:-1:end-number_inputs+1,1); 1];
for j=1:nodes_hidden_layer,
p(j,1) = 0;
for i=1:number_inputs+1,
p(j,1) = p(j,1) + wij(j,i) * E(i);
end
end
q_mfa = [sigm(p(:,1)); 1];
dy_du = 1;
for j=1:nodes_hidden_layer,
dwl(j,1:number_inputs+1) = eta * Kp * dy_du * err * ...
q_mfa(j) * (1-q_mfa(j)) * E(1:number_inputs+1) * sum(hi);

```

```

end
    dw2 = eta * Kp * dy_du * err * q_mfa';
        wij = wij + dw1;
        hi = hi + dw2;
    mfa = nnevalxsgm(NetDef,wij,hi,E(1:end-1));
    u = Kp * (err + mfa);
    u_k(k)=Kp * (err + mfa);
Nset=u;
if Nset<0
    Nset=0;
end

[t01,c01]=ode15s('MFA_procesas',tspan0,c00,options);

cel_triuksmas_k=c01(end,10)+0.1*randn;
c00=[c01(end,:)]';
t=[t;t01(end)];
c=[c;c01(end,:)];
q1=[q1;q(end,:)];

end

errvec_pagal_t=errvec(2:end);
vidutine_paklaida3=sum(abs(errvec)/length(errvec))

figure(9);
plot(t,q1(:,2));
title('Deguonies suvartojimo greitis, OUR');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('OUR, mmol/s');
grid on;

figure(11);
plot(errvec);
grid on;
xlabel('iteration');
ylabel('error, %');

figure(7);
plot(t,q1(:,1));
title('Biomasės augimo greitis, \mu');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('\mu, 1/s');
grid on;

figure(12);
plot(t,q1(:,9));
title('Pamaitinimo profilis, F_1');
ylabel('F_1, kg/s');
xlabel('Laikas, s');
grid on;

figure(8);
plot(t, c(:,10),t,DOC_set);
title('DOC_set');
xlabel('time, s');
ylabel('DOC');

figure(10);
plot(t,c);
legend('x','s','px','w','Q_air','N','cdo','yo2','ael','cel');

```

## 2 priedas. Funkcijos „MFA\_procesas“ Matlab programos kodas

```
function dc_dt=MFA_procesas(t,c)
global q OUR mumax time_ind sf ki T Tref
global alfa ks Yxs m Tpx km kimu kmu mox Yox
global mu F DOC_set Qair_set Nset H Kc Tell Tel2 Tq Tn V alpha beta epsilon
global gama Nimmol Qair_0 N_0 cdo_0 yo2_0 ael_0 cel_0 err errvec errvektorius E
e_t_norm2 N

for i=1:length(c)
    if c(i)<0, c(i)=0; end, end
%=====
% Būsenos kintamieji
x=c(1); s=c(2); px=c(3); w=c(4);
Qair=c(5); N=c(6); cdo=c(7); yo2=c(8); ael=c(9); cel=c(10);

Fe = -0.002/3600;
if t<4.0*3600
    Fsmp = -0;
else
    Fsmp = -0.015/3600;
end

mox=0.15/3600;
Yox=0.5;

if t<time_ind, T=Tref; else T=32; end

mu=mumax*(s/(ks+s))*(ki/(ki+s))*exp(alfa*(T-Tref));           %biomasės augimo greičio
skaičiavimas
qs=(mu/Yxs)+m;                                               %substrato suvartojimo
greičio skaičiavimas
pmax=(mu*km)/(kmu+mu+(mu*mu/kimu));
qpx=(pmax-px)/Tpx;
F2=Fsmp;
F1=0.001*mu*x*w+Fe;
ut=0;
OUR=((Yox*mu*x)+(mox*x))*1000/32;

OURni=OUR/w;

if t<time_ind
    qpx=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Pamaitinimo profilis%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if t<5.2*3600
    F=0;
end
if t>=5.2*3600 & t<6.8*3600
    F=((0.1111/12960000)*(t.^2)-(1.0459/3600)*t+2.6599)*10/3600;
end
if t>=6.8*3600 & t<8*3600
    F=0.001979;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%---Dif lygčių skaičiavimas-----
dc_dt(1,1) = mu*x-(F+F1)*x/w;                               %dx/dt
dc_dt(2,1) = -qs*x+F*(sf/w)-(F+F1)*s/w;                   %ds/dt
```

```

dc_dt(3,1) = qpx; %dpx/dt
dc_dt(4,1) = F+F1+F2; %dw/dt
dc_dt(5,1)=1/Tq*(Qair_set-Qair); %dQair/dt
dc_dt(6,1)=1/Tn*(Nset-N); %dN/dt
dc_dt(7,1)=-OURni*cdo/(Kc+cdo)+alpha*N^beta*Qair^gama*(yo2/H-cdo); %dcdo/dt
dc_dt(8,1)=Qair/V*(1/epsilon-1)*(0.21-yo2)-alpha*N^beta*Qair^gama*(1/epsilon-1)*(yo2/H-cdo)*Nimmol; %dyo2/dt
dc_dt(9,1)=1/Tel1*(100*H*cdo/0.21-ael); %dael/dt
dc_dt(10,1)=1/Tel2*(ael-cel); %dcel/dt

q=[q;mu OUR N x s px w qs F];

```

### 3 priedas. Matlab/Simulink programos funkcijos

#### miu, qs, F\_Smp, Fe bloko funkcija:

```

function [miu,qs,F_smp,Fe] = fcn (t,s)
alfa=0.0495; %temperatūrinė konstanta, [1/oC]
Tpx=1.495*3600; %atitinkama laiko konstanta,[s]
ki=93.8; %slopinimo konstanta substrato suvartojimui[g/kg]
ks=0.00333; %Monodo konstanta substrato suvartojimui, [g/kg]
mumax=0.737/3600; %maksimalus specifinis biomasės augimo greitis, [1/s]
kimu=0.0174/3600; %slopinimo konstanta baltymų modelyje, [1/s]
Yxs=0.46; %biomasės/substrato išeiga, [g/g]
kmu=0.61/3600; %Monodo konstanta baltymų modelyje, [1/s]
m=0.0242/3600; %biomasės palaikymo koeficientas, [g/g/s]
miu=miu_max*(s/(ks+s))*(ki/(ki+s))*exp(alfa*(37-37));
Fe=-0.002/3600;
if t<4*3600
F_smp=0;
else
F_smp= -0.015/3600;
end

```

#### OUR bloko funkcija:

```

function OUR = fcn(miu,x,w)
mox=0.15/3600; %deguonies suvartojimo parametras susijęs su biomasės
palaikymu [g/g/s]
Yox=0.5; %deguonies sunaudojimo išeiga susijusi su biomasės
augimu, [g/g]
OUR=((Yox*miu*x)+(mox*x))*w*1000/32; %deguonies suvartojimo greitis, mmol/s
End

```

#### 4 priedas. Matlab/Simulink programos vaizdas su PI reguliatoriaus valdymo sistema

