



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Vaičiulis**

Projekto autorius

**Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Tomas Vaičiulis**

Projekto autorius

**Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas**

Vadovas

**Lekt. dr. Darius Ezerskis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tomas Vaičiulis

## **Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Vaičiulio, baigiamasis projektas tema „Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Vaičiulis, Tomas. Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: metantankas, adaptyvi valdymo sistema, PID reguliatorius.

Kaunas, 2020. 61 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame magistro projekte analizuojama metantanko sistema, kurioje vykdomas nuotekų biologinio valymo anaerobinis procesas. Biodujų gamybos proceso efektyvumas metantanke reikšmingai priklauso nuo pūdomo dumblo temperatūros, kurią bioproceso metu reikia palaikyti optimaliame lygyje. Šiame darbe pasiūlyta adaptyvi metantanko temperatūros valdymo sistema, kuri įvertina valdomo proceso dinaminių savybių priklausomybę nuo procesą trikdančių išorinių poveikių, ir adaptuoja reguliatoriaus derinimo parametrus prie kintamos proceso būsenos. Reguliatoriaus parametrų adaptacijai naudojamas stiprinimo numatymo (angl. *gain scheduling*) metodas. Darbo skaičiavimai ir valdymo sistemų veikimo tyrimas atlikti naudojant *MATLAB/SIMULINK* programinį paketą.

Valdymo sistemos algoritmų kūrimui ir sistemos veikimo tyrimui naudojamas metantanko būsenos matematinis modelis. Reguliatoriaus adaptacijos algoritmai sudaryti remiantis imitacinio modeliavimo būdu atliktu valdomo proceso dinaminių savybių tyrimu. Darbe pateikti adaptyvios valdymo sistemos veikimo tyrimų rezultatai kompensuojant trikdančius poveikius plačiuose įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros kitimo diapazonuose. Adaptyvios sistemos veikimo kokybės rodikliai palyginti su įprastos, pastoviai suderintos valdymo sistemos rodikliais.

Vaičiulis, Tomas. Development and investigation of methane tank temperature adaptive control system. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. habil. dr. Donatas Levišauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: methane tank, adaptive control system, PID controller.

Kaunas, 2020. 61 p.

### **Summary**

The final master's project analyzes the methane tank system, in which the anaerobic process of biological wastewater treatment is carried out. The efficiency of the biogas production process in the methane tank significantly depends on the temperature of the decomposed sludge, which needs to be maintained at an optimal level during the bioprocess. In this work, an adaptive control system of methane tank was proposed. This system evaluates the dependence of the dynamic properties of the controlled process on the external influences interfering with the process, and adapts the regulator debugging parameters to the changing process status. The gain scheduling method is used for the adaptation of the regulator parameters. Calculations in the project and research of the control systems operation were performed using *MATLAB/SIMULINK* software package.

A mathematical model of the methane tank status is used to develop control system algorithms and to research the operation of the system. The research of the dynamic properties of the controlled process was performed by modeling and based on the results of the study, the regulator adaptation algorithms were developed. The results of the adaptive control system operation research are presented in the final project. These results were obtained by compensating the interfering effects over the wide ranges of volumetric flow of in-flowing sludge and temperature. The performance quality indicators of the adaptive system are compared to the indicators of the normal, constantly harmonized management system.

## Turinys

Lentelių sąrašas .....	7
Paveikslų sąrašas .....	8
Įvadas.....	11
<b>1. Adaptyvaus valdymo sistemos samprata ir metodai.....</b>	<b>12</b>
1.1 Etaloniniais modeliais pagrįstas adaptyvus valdymas.....	12
1.2 Taisyklėmis paremtas adaptyvus valdymas.....	14
1.3 Adaptacijos metodų taikymas.....	14
<b>2. Metantanko procesas.....</b>	<b>15</b>
2.1 Anaerobinis pūdymas .....	15
2.1 Metantanko sistemos tipai .....	16
2.1 Metantanko sistemos privalumai ir trūkumai .....	17
2.3 Metantanko sistemos projektavimas.....	18
2.4 Metantanko proceso būsenų lygtys .....	19
<b>3. Adaptyvios valdymo sistemos projektavimas .....</b>	<b>20</b>
3.1 Metantanko technologinio proceso matematinio modelio realizavimas <i>MATLAB/SIMULINK</i> aplinkoje .....	21
3.2 Modeliavimo eksperimentai, skirti ištirti įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros įtaką proceso dinaminiam parametrams .....	22
3.3 Aproximuojančių polinomų $T = f(Fin, Tin)$ , $K = f(Fin, Tin)$ , kurie leidžia įvertinti dinaminių parametų priklausomybę nuo įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros, nustatymas.....	25
3.4 Dinaminių parametų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominių lygčių, palyginimas.....	27
3.5 Tiriama proceso dinaminių parametų prognozavimas .....	28
3.6 Temperatūros nuostato sekimo palyginimas naudojant regulatoriaus <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> derinimo metodus.....	30
3.7 Trikdžio kompensavimo palyginimas naudojant regulatoriaus <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> derinimo metodus .....	32
3.8 Adaptyvaus regulatoriaus poreikio tyrimas sekant nuostatą .....	33
3.9 Adaptyvaus regulatoriaus poreikio tyrimas kompensuojant trikdantį poveikį.....	35
3.10 Diskretinio <i>PID</i> regulatoriaus pritaikymas.....	36
<b>4. Rezultatai.....</b>	<b>38</b>
4.1 Adaptacijos valdymo algoritmo tyrimas kompensuojant trikdančius poveikius.....	38
4.2 Adaptacijos valdymo algoritmo temperatūros nuostato sekimo tyrimas.....	48
<b>Išvados .....</b>	<b>50</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>51</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>54</b>
1 priedas. Laiko pastoviosios paviršiaus sudarymas izolinijomis <i>MATLAB</i> pakete.....	54
2 priedas. Stiprinimo koeficiento paviršiaus sudarymas izolinijomis <i>MATLAB</i> pakete.....	55
3 priedas. Diskretinio regulatoriaus modelis .....	56
4 priedas. Polinominės lygties $T = f(Fin, Tin)$ modelis.....	57
5 priedas. Polinominės lygties $K = f(Fin, Tin)$ modelis .....	58
6 priedas. Sinusinio signalo trikdžio kompensavimui naudojamas modelis .....	59
7 priedas. Nuostato sekimo tyrimo modelis .....	61

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Būsenos lygčių parametrai [2].....	19
<b>3.1 lentelė.</b> Metantanko proceso įėjimai .....	21
<b>3.2 lentelė.</b> Metantanko proceso išėjimai.....	21
<b>3.3 lentelė.</b> Modeliavimo būdu, naudojant <i>C.L.Smith</i> metodą, apskaičiuoti proceso dinaminiai parametrai .....	24
<b>3.4 lentelė.</b> Laiko pastoviųjų ir stiprinimo koeficientų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominių lygčių, palyginimas .....	27
<b>4.1 lentelė.</b> Metantanko dumblo temperatūros valdymo sistemų trikdžio kompensavimo kokybės rodikliai, naudojant neadaptvų ir adaptvų reguliatorius .....	46
<b>4.2 lentelė.</b> Metantanko dumblo temperatūros valdymo sistemų nuostato sekimo kokybės rodikliai, naudojant neadaptvų ir adaptvų reguliatorius.....	49

## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Adaptyvios valdymo sistemos struktūra su etaloniniu proceso modeliu (angl. <i>model-based adaptive control</i> ) [3].....	13
<b>1.2 pav.</b> Adaptyvios valdymo sistemos struktūra su stiprinimo numatymu (angl. <i>gain scheduling</i> ) [5] .....	13
<b>2.1 pav.</b> Anaerobinio proceso organinių medžiagų skaidymo etapai [13].....	15
<b>2.2 pav.</b> Anaerobinio proceso sluoksniai paprasčiausiame metantanke [13].....	16
<b>2.3 pav.</b> Metantankas su įdiegta šildymo ir maišymo sistema [13] .....	16
<b>2.4 pav.</b> Dviejų metantankų sistema [13].....	17
<b>2.5 pav.</b> 2017 m. nusausinto dumblo kiekių pašalinimas ir panaudojimas Lietuvoje [24].....	18
<b>2.6 pav.</b> Metantanko proceso sistemos projektavimas [2] .....	18
<b>3.1 pav.</b> Projektuojamos metantanko valdymo sistemos struktūra .....	20
<b>3.2 pav.</b> Modelio lygčių integravimo blokas <i>DEE</i> .....	21
<b>3.3 pav.</b> Metantanko proceso modeliuojami įėjimo ir išėjimo parametrai.....	22
<b>3.4 pav.</b> Modeliavimo eksperimentų planas.....	23
<b>3.5 pav.</b> Metantanko įtekančio dumblo tūrinio srauto <i>Fin</i> šuolis (nuo 10 iki 12 m <sup>3</sup> /h, temperatūra 4 °C).....	23
<b>3.6 pav.</b> Metantanko dumblo temperatūros <i>Ts</i> reakcija į trikdžio <i>Fin</i> šuolį (nuo 10 m <sup>3</sup> /h iki 12 m <sup>3</sup> /h, 4 °C) .....	23
<b>3.7 pav.</b> Dinaminių parametrų nustatymas naudojant <i>C.L.Smith</i> metodą [5] .....	24
<b>3.8 pav.</b> Laiko pastoviųjų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominės lygties $T = f(Fin, Tin)$ , palyginimas .....	27
<b>3.9 pav.</b> Stiprinimo koeficientų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominės lygties $K = f(Fin, Tin)$ , palyginimas .....	28
<b>3.10 pav.</b> Laiko pastoviosios prognozavimas naudojant polinominę lygtį $T = f(Fin, Tin)$ , reakcijos paviršiaus vaizdavimas izolinijomis.....	28
<b>3.11 pav.</b> Laiko pastoviosios prognozavimas, $T = f(Fin, Tin)$ reakcijos paviršius.....	29
<b>3.12 pav.</b> Stiprinimo koeficiento prognozavimas naudojant polinominę lygtį $K = f(Fin, Tin)$ , reakcijos paviršiaus vaizdavimas izolinijomis .....	29
<b>3.13 pav.</b> Stiprinimo koeficiento prognozavimas, $K = f(Fin, Tin)$ reakcijos paviršius .....	29
<b>3.14 pav.</b> Vienkontūrė valdymo sistema nuostato sekimui.....	30
<b>3.15 pav.</b> Temperatūros nuostato sekimas naudojant <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> metodais suderintą reguliatorių ( <i>Fin</i> 10 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 4 °C).....	30
<b>3.16 pav.</b> Temperatūros nuostato sekimas naudojant <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> metodais suderintą reguliatorių ( <i>Fin</i> 50 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 18 °C).....	31
<b>3.17 pav.</b> Vienkontūrė valdymo sistema trikdžio kompensavimui .....	32
<b>3.18 pav.</b> Trikdžio kompensavimas naudojant <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> metodais suderintą reguliatorių ( <i>Fin</i> 10 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 4 °C) .....	32
<b>3.19 pav.</b> Trikdžio kompensavimas naudojant <i>IMC</i> ir <i>ITAE</i> metodais suderintą reguliatorių ( <i>Fin</i> 50 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 18 °C) .....	33
<b>3.20 pav.</b> Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio įrodymas nuostato sekimui ( <i>Fin</i> 10 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 4 °C).....	34
<b>3.21 pav.</b> Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio įrodymas nuostato sekimui ( <i>Fin</i> 50 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 18 °C) .....	34



<b>3.22 pav.</b> Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio įrodymas trikdžio kompensavimui ( $Fin$ 10 m <sup>3</sup> /h, $Tin$ 4 °C).....	35
<b>3.23 pav.</b> Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio įrodymas trikdžio kompensavimui ( $Fin$ 50 m <sup>3</sup> /h, $Tin$ 18 °C).....	36
<b>3.24 pav.</b> Metantanko temperatūros trikdžio kompensavimo reakcijos naudojant diskretinį ir tolydinį reguliatorius .....	37
<b>3.25 pav.</b> Metantanko temperatūros nuostato sekimo reakcijos naudojant diskretinį ir tolydinį reguliatorius .....	37
<b>4.1 pav.</b> Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos modelis .....	38
<b>4.2 pav.</b> Metantanko adaptyvaus valdymo sistemos veikimo tyrimas kompensuojant trikdančius poveikius: a) įtekančio dumblo tūrinio srauto (nuo 40 m <sup>3</sup> /h iki 30 m <sup>3</sup> /h) ir temperatūros (nuo 10 °C iki 18 °C) signalas, trikdžio kompensavimui tirti; b), c) atitinkamai metantanko proceso stiprinimo koeficiento ir laiko pastoviosios laiko trajektorijos; d), e), f) atitinkamai PID reguliatoriaus stiprinimo koeficiento, integralinės dedamosios ir diferencialinės dedamųjų adaptacijos laiko trajektorijos; g) valdomos metantanko temperatūros laiko trajektorija.....	40
<b>4.3 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems pirmojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 1) .....	41
<b>4.4 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems antrojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 2) .....	41
<b>4.5 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems trečiojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 3) .....	42
<b>4.6 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems ketvirtojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 4) .....	42
<b>4.7 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems penktojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 5) .....	43
<b>4.8 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems šeštojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 6) .....	43
<b>4.9 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems septintojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 7) .....	44
<b>4.10 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos	

regulatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems aštuntojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 8) .....	44
<b>4.11 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu regulatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos regulatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems devintojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 9) .....	45
<b>4.12 pav.</b> Adaptyviosios valdymo sistemos veikimo modeliavimas kompensuojant periodiškai kintančio įtekančio dumblo tūrinio srauto trikdančią poveikį: a) įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros laiko trajektorijos; b), c), d) atitinkamai PID regulatoriaus stiprinimo koeficiento, integralinės dedamosios ir diferencialinės dedamųjų adaptacijos laiko trajektorijos; e) valdomos metantanko temperatūros laiko trajektorija. Temperatūros valdymo kokybės palyginimui e) grafike pateikti modeliavimo rezultatai, valdymui naudojant sistemą su pastoviai suderintu regulatoriumi. ....	48

## Įvadas

Per pastaruosius kelis dešimtmečius labai padidėjo gamybos efektyvumas ir kokybė. Šiuolaikinis pramoninio valdymo procesas yra priskirtas netiesinių sistemų klasei. Dažniausiai proceso veikimas yra nenuspėjamas, o savybės yra įvairios, todėl naudojamas netiesinis sistemos modelis, kuris leidžia išspręsti valdymo sistemos projektavimo problemas [1]. Netiesinis sistemos modelis yra naudojamas ir metantanko proceso sistemai valdyti [2].

Metantanke naudojant mikroorganizmus yra skaidomas dumblas ir čia išskiriamos metano ir anglies dioksido dujos. Šioje talpoje yra įdiegtos maišymo, šildymo ir metano dujų surinkimo sistemos. Talpos yra didžiulės, todėl yra naudojami temperatūros jutikliai skirtingose metantanko vietose. Fiksuojant skirtingas dumblo temperatūras yra pagreitinamas nuotekų maišymas. Šildymo sistemą sudaro šilumokaitis. Naudojant šilumokaitį yra reguliuojama temperatūra metantanke.

Dumblo skaidymo greitis priklauso nuo metantanko temperatūros, todėl svarbu tiksliai palaikyti temperatūrą ir kompensuoti išorinius trikdžius. Išankstinis žinojimas apie trikdį suteikia galimybę atlikti kompensavimo veiksmus prieš bet kokį trikdį, kuris gali pakenkti objekto reakcijai. Metantanko proceso sistemos pagrindiniai trikdantys poveikiai yra įtekančio dumblo srautas ir temperatūra, todėl šie išoriniai poveikiai yra matuojami kuriant valdymo sistemą. Įtekančio dumblo srautas kinta nuo 10 m<sup>3</sup>/h iki 50 m<sup>3</sup>/h, o temperatūra nuo 4 °C iki 18 °C. Dėl šių išorinių poveikių kitimo, valdomo objekto dinaminės savybės keičiasi plačiose ribose. Vienkontūrė temperatūros valdymo sistema neužtikrina reguliavimo kokybės, todėl reikia sukurti prisitaikančią valdymo sistemą, kuri gebėtų perskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrus pagal išorinius poveikius.

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti metantanko proceso adaptyvią valdymo sistemą, kuri, keičiantis įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai plačiose ribose, palaikytų metantanke pastovią dumblo temperatūrą.

Darbo uždaviniai:

1. apžvelgti adaptyvius valdymo algoritmus ir išnagrinėti metantanko technologinį procesą;
2. sudaryti tiriamojo proceso modelį *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje;
3. atlikti modeliavimo eksperimentus, skirtus nustatyti pagrindinių trikdančių poveikių įtaką tiriamojo proceso dinaminiam parametrams;
4. nustatyti proceso stiprinimo koeficiento ir atstojamosios laiko pastoviosios funkcines priklausomybes nuo įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros;
5. sudaryti valdymo sistemos reguliatoriaus adaptacijos algoritmą;
6. imitacinio modeliavimo būdu įvertinti adaptyvios valdymo sistemos veikimą kompensuojant ribinius trikdančius poveikius;
7. palyginti adaptyvios ir įprastos valdymo sistemų veikimo kokybės rodiklius.

## 1. Adaptyvaus valdymo sistemos samprata ir metodai

Proceso valdymo problemoms išspręsti dažnai nepakanka reguliatoriaus su pastoviais parametrais. Jei proceso veikimo sąlygos ar aplinka labai pasikeičia, reguliatoriaus parametrai gali būti perskaičiuojami. Reikia žinoti, kada perskaičiuoti valdymo parametrus, todėl privalu nuolat stebėti besikeičiančias sąlygas, kurios gali paveikti proceso reguliavimo kokybę. Jeigu dažnai keičiasi veikimo sąlygos, reikia atsižvelgti į adaptyvaus valdymo technologijų naudojimą [1].

**Adaptyvioji valdymo sistema** yra tokia, kurioje valdiklio parametrai yra koreguojami automatiškai, kad kompensuotų besikeičiančias proceso sąlygas. Šios sąlygos gali būti įvairios:

- įrangos charakteristikų pokyčiai (šilumokaičio užteršimas, katalizatoriaus užsikimšimas);
- neįprasta eksploataavimo būseną (gedimai, įjungimas, išjungimas);
- dideli, dažni sutrikimai (degalų kokybė);
- aplinkos kitimas (lietaus audros, dienos ciklai);
- produkto specifikacijos pokyčiai (nuo temperatūros keičiasi produkto savybės);
- netiesinės sistemos (cheminių reakcijų greičio priklausomybė nuo temperatūros) [1].

Žodis **adaptacija** reiškia „prisitaikymą“. Valdomo objekto sąlygos gali kisti mums neprognozuojant ar nežinant, tačiau sistema privalo prisitaikyti prie pasikeitusių veiksnių ir juos kompensuoti.

Remiantis šaltiniu [3] adaptyviausias valdymo sistemas galima suskirstyti į dvi kategorijas:

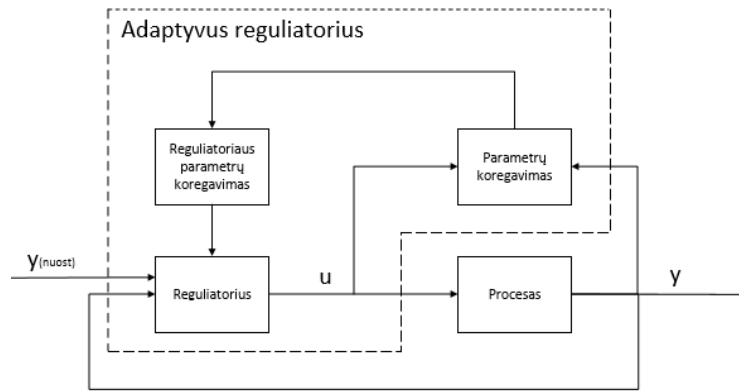
- etaloniniu proceso modeliu pagrįstas valdymas (angl. *model-based*);
- taisyklėmis pagrįstas valdymas (angl. *rule-based*).

Tradiciniai fiksuotų parametrų valdikliai dažnai kuriami naudojant modeliu pagrįstą valdymo teoriją. Sudaromi matematiniai modeliai remiantis praeities proceso elgsena. Daroma prielaida, kad procesas elgsis ateityje taip pat kaip ir praityje.

Matematinės lygtys apibūdina priklausomybę, kaip įėjimai paveikia išėjimus. Šios lygtys gaunamos įvairiausiais metodais: slenkančiojo vidurkio lygtys, perdavimo funkcijos, diferencialinės lygtys, būsenos lygtys, neuroniniai tinklai [4].

### 1.1 Etaloniniais modeliais pagrįstas adaptyvus valdymas

Etaloniniais modeliais pagrįstas adaptyvus valdymas dažniausiai remiasi įprastinio proceso modelio perdavimo funkcijomis arba būsenos lygtimis. Adaptyvioji valdymo sistemos struktūra pateikta 1.1 pav.



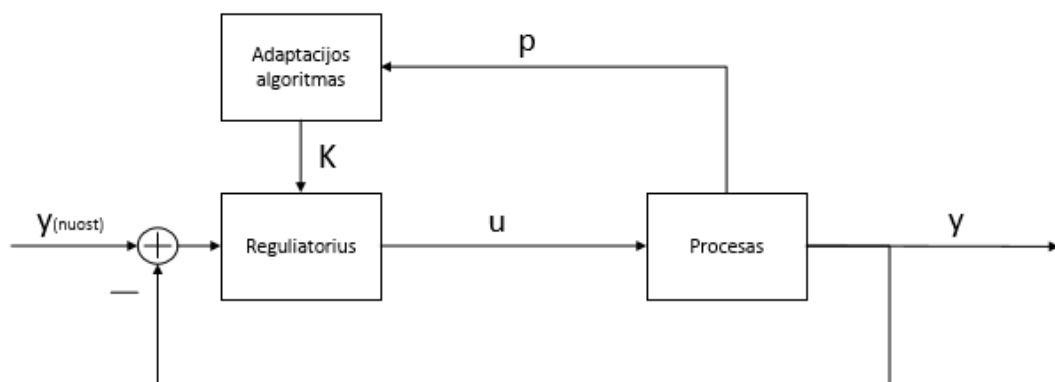
**1.1 pav.** Adaptivios valdymo sistemos struktūra su etaloniniu proceso modeliu (angl. *model-based adaptive control*) [3]

Šis adaptivusis valdymas naudojamas, kai proceso kitimas yra neprognozuojamas [5]. Nuolat stebint įėjimo ir išėjimo signalus yra identifikuojami proceso parametrai ir siunčiami į parametru koregavimo bloką. Yra daug metodų parametrams įvertinti, vienas iš jų – mažiausių kvadratų metodas. Šiame bloke parametrai įvertinami ir siunčiami į valdiklio parametru koregavimo bloką. Čia perskaičiuojami valdiklio parametrai naudojant derinimo taisykles. Paleidžiant valdymo sistemą svarbu užtikrinti, kad adaptacijai pradėdant būtų naudojami tinkami valdiklio parametrai. Paleidimo metu dėl netinkamų pradinų valdiklio parametru sistemos darbas gali tapti nestabilus [3].

**Adaptivus stiprinimo numatymo metodas** naudojamas, kai proceso kitimai yra prognozuojami [5]. Pagal proceso darbo būsenas nustatomi dinaminiai parametrai ir iš jų sudaromos polinominės lygtys. Reguliatoriaus parametrai apskaičiuojami iš polinominių lygčių.

Šiame metode darbo būsenose yra naudojami lokalūs tiesiniai reguliatoriai. Šių reguliatoriu parametrai automatiškai perskaičiuojami, kai įvyksta proceso sąlygu pasikeitimai [5]. Dėl to, svarbu nuolat stebėti valdomo objekto išorinius ar vidinius pokyčius, į kuriuos adaptivi valdymo sistema privalo reaguoti.

Iš pradžių šis metodas buvo taikomas skrydžio sistemoms valdyti. Naudojamas lėktuvo šoniniams ir kryptiniams judesiams reguliuoti [6]. Vėliau šis stiprinimo numatymo metodas buvo pritaikytas valdyti technologinius procesus. Pavyzdžiui, šis paprastas metodas gali sumažinti rūgštingumo pH verčių svyravimą mikroorganizmų kultūrose [7].



**1.2 pav.** Adaptivios valdymo sistemos struktūra su stiprinimo numatymu (angl. *gain scheduling*) [5]

## 1.2 Taisyklėmis paremtas adaptyvus valdymas

Adaptyvus valdymas remiasi taisyklėmis, kurios yra nustatomos analizuojant proceso elgseną. Procesui valdyti naudojamas sukauptas taisyklių rinkinys. Tik išsamiai išanalizavus procesą galima tinkamai parinkti taisykles. Jų formatas gali būti įvairus, tačiau dažniausiai tai yra loginės sąlygos, *IF-THEN-ELSE* forma. Pavyzdžiui, „Jei proceso temperatūra yra aukštesnė už 100 °C, tada atidaryti aušinimo vandens vožtuvą dar 20 %”[8].

Dažniausiai taisyklių rinkinys nustatomas bandymo klaidų metodais. Šiuo metodu galima padaryti išvadas iš neišsamių ir kartais netikslių taisyklių rinkinių. Galima privesti procesą dirbti tokiais sąlygomis, apie kurias niekas anksčiau negalvojo. Šiuo metodu galima atrasti geresnį valdymo sprendimą, kuris anksčiau nebuvo pastebėtas vien dėl to, kad procesas buvo valdomas tam tikru pastoviu būdu [8].

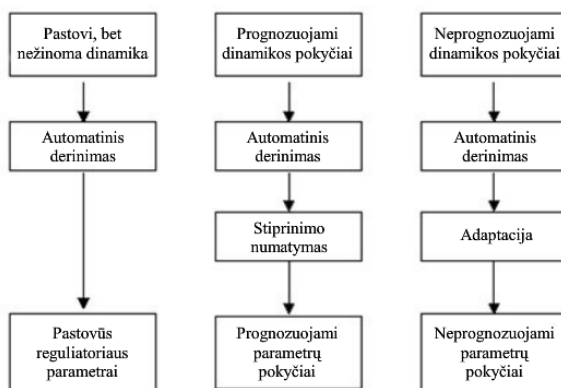
Nežinant proceso elgsenos taisyklėmis paremta strategija nėra tokia efektyvi. Dažnai adaptyvi valdymo sistema yra pranašesnė prieš fiksuotomis taisyklėmis paremtą strategiją. Šaltinyje teigiama [9], kad nuotekų valymo įrengime naudojant adaptyvią valdymo sistemos strategiją, remiantis proceso matematinio modeliu, vidutinis azoto ir fosforo šalinimo efektyvumas yra daugiau nei 84 % ir 89 %. Lyginant su fiksuotomis taisyklėmis paremta strategija azoto šalinimo efektyvumas yra pagerintas 25,11 %.

Vėliau buvo pradėtos kurti valdymo sistemos, kuriose vienas adaptyvus metodas papildė kitą. Tokia strategija gali remtis **neraiškia stiprinimo numatymo logika** (angl. *fuzzy gain scheduling*). Ši logika naudojama suvaldyti sudėtingas netiesines sistemas, kurias sunku modeliuoti naudojant standartinius tiesinės identifikacijos metodus [10].

Šiame metode vadovaujantis neraiškios logikos taisyklėmis yra perjungiami lokalaus regulatoriaus parametrai [11]. Pasinaudojant tokia logika gali būti valdoma nuolatinės srovės servo pavara, kurioje yra dideli netiesiškumai ir parametų variacijos [10].

## 1.3 Adaptacijos metodų taikymas

Prieš pasirenkant adaptyvią valdymo sistemą, svarbu išsiaiškinti proceso dinamiką (ar pastovi, ar kintanti plačiose ribose). Taip pat, svarbu žinoti, ar proceso pokyčiai yra numatomi ar ne. Jei šie kriterijai yra žinomi, tada yra lengviau parinkti adaptyvios valdymo sistemos metodą. Šių metodų parinkimą ir taikymą iliustruoja ir paaiškina 1.3 pav.

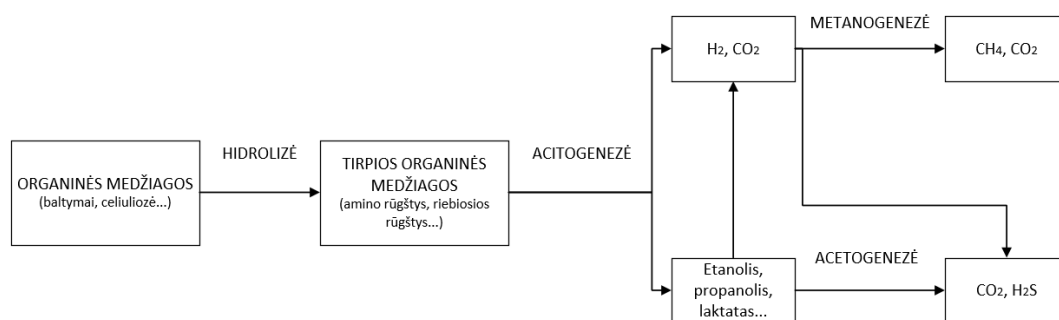


1.3 pav. Adaptacijos metodų galimybės [5]

## 2. Metantanko procesas

### 2.1 Anaerobinis pūdymas

Anaerobinį pūdyimą galima apibūdinti chemine reakcija, kai organinės medžiagos, tokios kaip gliukozė, anaerobinių mikroorganizmų pagalba biochemiškai skaidomos į anglies dioksidą ( $\text{CO}_2$ ) ir metaną ( $\text{CH}_4$ ). Svarbu paminėti, kad šis procesas vyksta terpėje, kurioje trūksta deguonies [12]. Anaerobinis skaidymas išskiriamas į keturis etapus: hidrolizės, acitogenezės, acetogenezės ir metanogenezės [13].



2.1 pav. Anaerobinio proceso organinių medžiagų skaidymo etapai [13]

Iš pradžių makromolekulės (baltymai, celiuliozė) skaidomos į amino rūgštis ir kitus monomerus. Riebalų, aminų rūgštys yra tirpios vandenyje. Šis hidrolizės etapas yra lėčiausias. Kitame acitogenezės etape monomerai virsta į alkoholius ir dujas ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ). Trečiame etape (acetogenezės) gaunami anglies dioksido, vandenilio ir acto rūgšties produktai. Šiuose žingsniuose nėra sunaikinamos organinės medžiagos, o tik paruošiamos paskutiniam metanogenezės etapui [13]. Ketvirtame metanogenezės etape pašalinamos organinės medžiagos, iš kurių susidaro metano dujos. Šių dujų didžiausias kiekis susidaro iš amino rūgščių [13].

Anaerobinis pūdyimas priklauso nuo temperatūros, dumblo sudėties ir rūgštingumo. Skirtingiems mikroorganizmams vystymosi temperatūra skiriasi. Pagal temperatūrą mikroorganizmai skirstomi į termofilinius, mezofilinius ir psichrofilinius [13].

Nuotekų sudėtis, taip pat, įtakoja biodujų gamybą. Mikroorganizmai susideda iš azoto, deguonies, vandenilio ir anglies, todėl svarbu, kad šių elementų būtų pakankamai nuotekų sudėtyje [13]. Taip pat, svarbus maisto medžiagų kiekis. Jei šių medžiagų kiekis yra nepakankamas, mikroorganizmai negali daugintis ir gyvuoti.

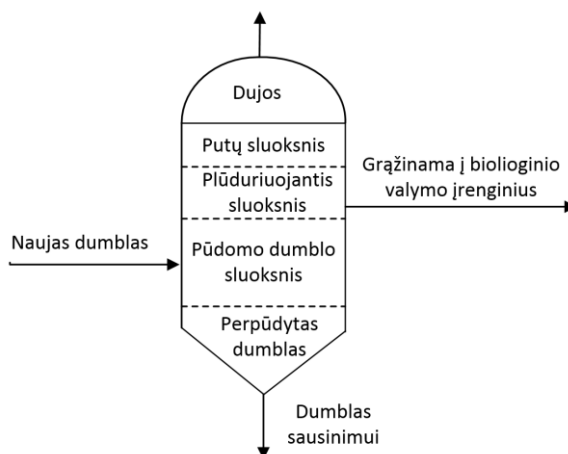
Nuotekų rūgštingumas yra svarbi anaerobinio proceso dalis. Kiekviena mikroorganizmų grupė turi skirtingą optimalų pH intervalą. Ketvirtame etape (metanogenezės) svarbu užtikrinti, kad rūgštingumas būtų neutralus (6,5 iki 7,2 pH) [14]. Šiame etape ypač jautrūs mikroorganizmai rūgštingumo svyravimui. Fermentuojantys mikroorganizmai gali gyvuoti didesniame pH intervale (4,0 iki 8,5 pH) [15].

Dumblo skaidymas anaerobiniu būdu yra ilgas procesas, todėl stengiamasi sudaryti mikroorganizmams kuo geresnes sąlygas daugintis ir gyvuoti. Kartais į dumblo skaidymo sistemą yra įpilamos senos atliekos, nes jose yra svarbiausi anaerobiniai mikroorganizmai ir pagrindiniai fermentai [18].

## 2.1 Metantanko sistemos tipai

Anaerobiniam procesui įgyvendinti yra statomos cilindrinės arba apvalios formos talpyklos [20, 21]. Cilindrinės formos rezervuaro skersmuo svyruoja nuo 6 iki 40 m. Minimalus dumblo gylis turi būti ne mažesnis kaip 7,5 m, kad būtų galima tinkamai išmaišyti susidariusius sluoksnius. Pramoniniai metantankai gali būti aukštesni nei 15 m. [14]. Kokio dydžio talpą statyti, priklauso nuo įtekančio dumblo kiekio. Kuo didesnė talpa, tuo daugiau galima pagaminti biudujų.

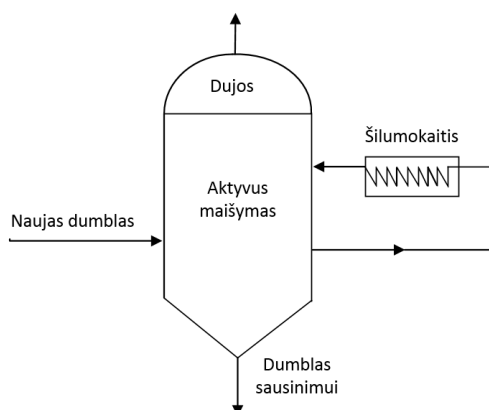
Metantanko sistemos yra įvairios. Paprasčiausiame metantanke, kuriame dumblas nėra maišomas ar šildomas, skaidymas vyksta 30–60 dienų [13].



2.2 pav. Anaerobinio proceso sluoksniai paprasčiausiame metatanke [13]

Tokiame metatanke išsiskyrusios biudujos sukuria nežymų maišymą, tačiau susidaro dumblo sluoksniai. Naudojant šią sistemą kietos medžiagos kaupiasi ant dugno, todėl periodiškai sistemą reikia išvalyti.

Dažniausiai statomi metantankai, kuriuose įdiegtos šildymo ir maišymo sistemos (žr. 2.3 pav.). Dumblo skaidymas trunka 15–30 dienų, kai jo temperatūra palaikoma 35 °C [13].



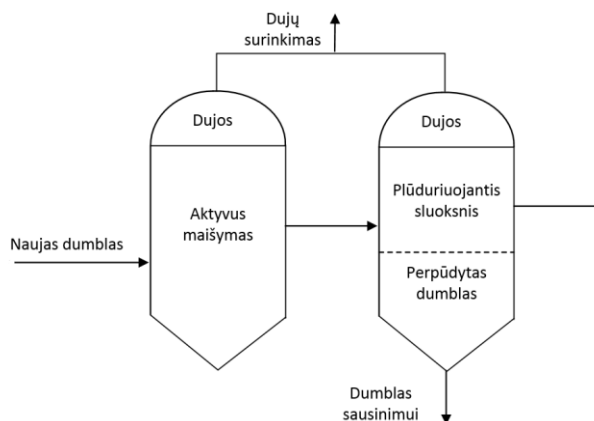
2.3 pav. Metantankas su įdiegta šildymo ir maišymo sistema [13]

Tokiose sistemose dažniausiai naudojami šilumokaičiai, kurie skirti palaikyti optimalią ir vienodą temperatūrą anaerobinio proceso metu. Maišymo sistema suvienodina dumblo tirštumą, temperatūrą ir panaikina sluoksnius.



Metantanko procesui realizuoti gali būti statomi du rezervuarai. Pirminiame rezervuare – vykdomas maišymas ir pagaminamas didžiausias biodujų kiekis. Antriniame rezervuare – kaupiamas perpūdytas dumblas ir išskiriamas daug mažesnis biodujų kiekis. Ši sistema yra lankstesnė, nes įvykus gedimui visą dumblą galima patalpinti kitame metantanke.

Antrinis rezervuaras atlieka svarbų vaidmenį skaidydamas dumblą į sluoksnius. Perpūdytas dumblas yra atskiriamas ir tiekiamas sausinimui. Ši sistema pavaizduota 2.4 pav.



2.4 pav. Dviejų metantankų sistema [13]

## 2.1 Metantanko sistemos privalumai ir trūkumai

Dumblo anaerobinis skaidymas pripažintas ekonomiška ir perspektyvia technologija, tačiau kiekviena sistema turi privalumų ir trūkumų [19].

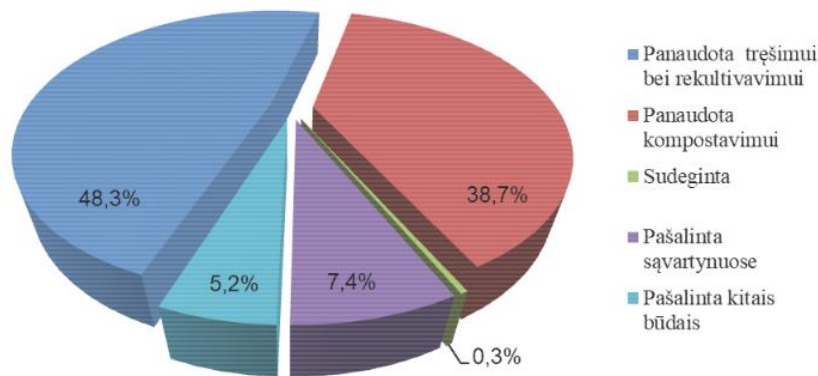
### Privalumai:

- dumblo skaidymui sunaudota energija sugražinama biodujų pavidalu;
- išskiriamas nereikšmingas neigiamas poveikis aplinkai [19].

### Trūkumai:

- metantankui būtina didelė ir nuošali vieta, dėl jo dydžio;
- didelė kaina;
- ilgas ir sudėtingas anaerobinis procesas;
- išskiriami dideli nusausinto dumblo kiekiai.

Visame pasaulyje komunalinių nuotekų valymo įrenginiai pagamina didžiulį kiekį dumblo. Pavyzdžiui, Kinijoje pagamintas dumblo kiekis 2015 metais buvo 40 mln. tonų [22]. Dėl griežtesnių aplinkos apsaugos taisyklių prognozuojama, kad ateityje susidaręs dumblo kiekis augs [23]. Lietuvoje 2017 m. susidarė 42487,5 tonų nusausinto dumblo [24].

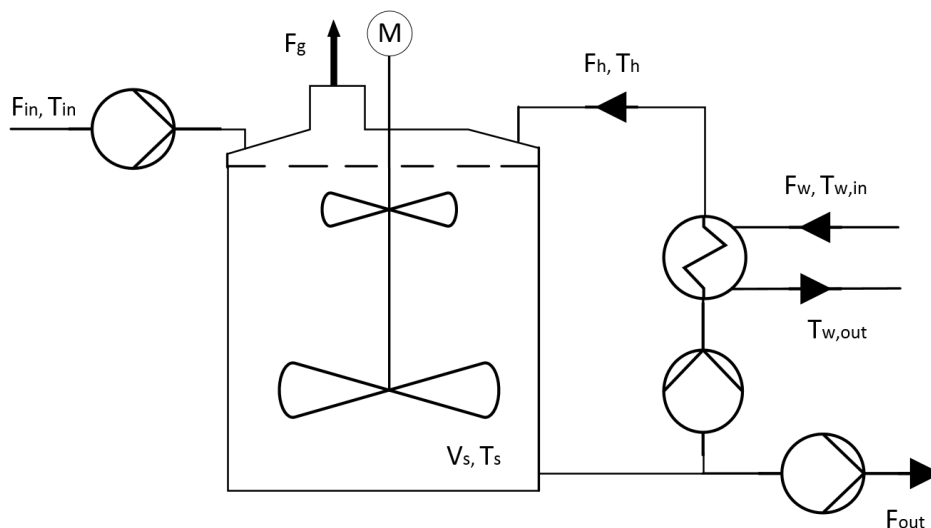


2.5 pav. 2017 m. nusausinto dumblo kiekių pašalinimas ir panaudojimas Lietuvoje [24]

Imtasi įvairių priemonių kaip šiuos susikaupusius dumblo kiekius naikinti. Didžiausi kiekiai Lietuvoje panaudojami tręšimui 48,3 %. Mažiausia dalis 0,3 % sudeginama.

### 2.3 Metantanko sistemos projektavimas

Biodujų gamybos procesas anaerobinio skaidymo būdu vyksta uždareme metano rezervuare, kuriame yra įdiegtos šildymo ir maišymo sistemos. Metantankas pavaizduotas 2.6 paveiksle. Pramoninio metantanko rezervuaro talpa yra apie 10 000 m<sup>3</sup> [2]. Į šį rezervuarą yra tiekiamas dumblas, kurio srautas žymimas  $F_{in}$ , o temperatūra  $T_{in}$ . Perpūdyto dumblo srautas yra  $F_{out}$ . Esant pastovioms darbo sąlygoms rezervuaro įtekantis ir ištekantis nuotekų srautas yra lygus  $F_{out} = F_{in}$ . Anaerobinio skaidymo būdu yra išskiriamos biodujos, kurios greitis  $F_g$ . Dumblas cirkuliuojamas per šilumokaičio sistemą srautu  $F_h$  (valdantis poveikis) ir taip yra reguliuojama temperatūra rezervuare  $T_s$  (kontroliuojamas kintamasis). Šildymo energiją tiekia vanduo, cirkuliuojantis per šilumokaitį, kurio srautas  $F_w$ , o temperatūra įtekanti  $T_{w,in}$ , ištekanti  $T_{w,out}$ . Šilumokaičio vandens temperatūra  $T_{w,in}$  ir srautas  $F_w$  yra nekintantys parametrai. Jų reguliuoti negalima [2]. Rūgimui geriausios sąlygos užtikrinamos, kai metantanke yra palaikoma 35 °C [13].



2.6 pav. Metantanko proceso sistemos projektavimas [2]

## 2.4 Metantanko proceso būsenų lygtys

Metantanko dinamika gali būti išreikšta metano rezervuaro ir šilumokaičio energijos balansais. Daroma prielaida, kad šilumokaitis gali būti laikomas vientisu parametru procesu, o energijos kaupimasis šilumokaityje yra nereikšmingas. Būsenos kintamųjų  $T_s, T_h, T_{w,out}$  energijos balansu pagrįstos lygtys yra šios [2]:

$$T_s = \frac{F_h}{V_s} (T_h - T_s) - \frac{F_{in}}{V_s} (T_s - T_{in}) - \frac{A_m h_m}{V_s \rho_s c_s} (T_s - T_{od}) , \quad (1)$$

$$T_h = \frac{A_h h_h}{V_{hs} \rho_s c_s} (T_{w,out} - T_h) - \frac{F_h}{V_{hs}} (T_h - T_s) , \quad (2)$$

$$T_{w,out} = \frac{F_w}{V_w} (T_{w,in} - T_{w,out}) - \frac{A_h h_h}{V_w \rho_w c_w} (T_{w,out} - T_h) - \frac{Q_{L,W}}{V_w \rho_w c_w} . \quad (3)$$

Naudojamos trys būsenų lygtys, kurių parametrai yra pateikti 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Būsenos lygčių parametrai [2]

Fizinės konstantos	Konstruktivūs parametrai	Įvertinti parametrai
$C_s = 4180 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$	$V_s = 9547,5 \text{ m}^3$	$A_h h_h = 1.016 \times 10^9 \text{ J}/(\text{h}^\circ\text{C})$
$\rho_s = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$	$V_{hs} = 3,98 \text{ m}^3$	$Q_{L,W} = 3,5 \times 10^6 \text{ J}/\text{h}$
$c_w = 4180 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$	$V_w = 3,81 \text{ m}^3$	$h_m = 7,934 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{h}^\circ\text{C})$
$\rho_w = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$	$A_m = 2040 \text{ m}^2$	

Kintamųjų ir konstantų pavadinimai:

$T_s$  – metantanko dumblo temperatūra,  $T_h$  – metantanko dumblo, cirkuliuojamo per šilumokaičio sistemą, temperatūra,  $T_{w,out}$ ,  $T_{w,in}$  – šilumokaičio įtekančio ir ištekančio dumblo temperatūra,  $T_{in}$  – įtekančio į metantanką dumblo temperatūra,  $T_{od}$  – lauko temperatūra,  $F_h$  – metantanko dumblo, cirkuliuojamo per šilumokaičio sistemą, srautas,  $F_{in}$  – įtekančio į metantanką dumblo srautas,  $F_w$  – šilumokaičio vandens srautas,  $V_s$  – metantanko dumblo tūris,  $V_{hs}$ ,  $V_w$  – dumblo ir vandens tūriai šilumokaityje,  $A_m$  – metantanko paviršiaus plotas,  $A_h$  – šilumokaičio šilumos perdavimo plotas,  $h_m$  – šilumos perdavimo koeficientas per metano rezervuaro paviršių,  $h_h$  – šilumos perdavimo koeficientas per šilumokaičio paviršių,  $c_s$ ,  $c_w$  – dumblo ir vandens specifinės šilumos talpos,  $\rho_s$ ,  $\rho_w$  – dumblo ir vandens tankis,  $Q_{L,W}$  – šilumos nuostoliai šilumokaičio paviršiuje.

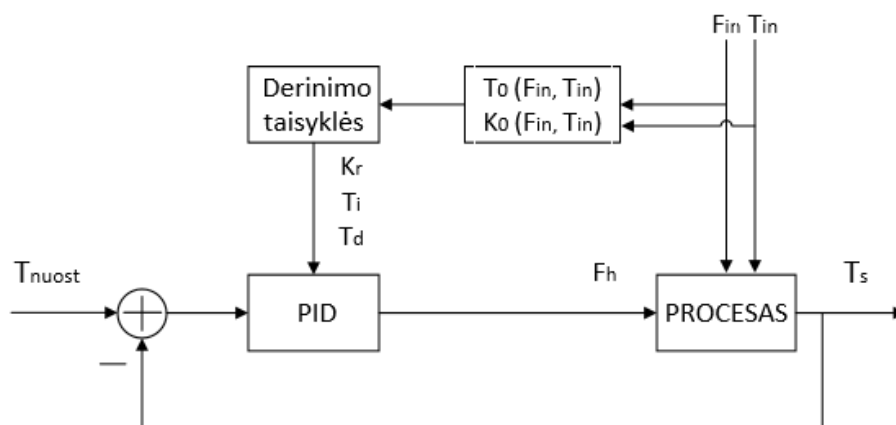
Projektuojant sistemą neatsižvelgiama į kitus metantanko energijos balanso faktorius, biocheminių reakcijų šilumą ar sklindančią energiją, nes jie yra maži, lyginant su kitomis pusiausvyros lygčių sąlygomis.

### 3. Adaptyvios valdymo sistemos projektavimas

Projektuojant adaptyvią valdymo sistemą yra atsižvelgiama į metantanko proceso technologinius reikalavimus. Metantanko dumblo temperatūra palaikoma 35 °C. Paklaida gali būti 1 °C. Prie šios temperatūros mikroorganizmai dauginasi ir gyvuoja. Didėjant mikroorganizmų skaičiui dumblo pūdymas greitėja ir yra išskiriamas didesnis metano dujų kiekis. Šiam procesui nėra naudingi staigūs metantanko dumblo temperatūros kitimai.

Prieš projektuojant sistemą yra nustatomi poveikiai, kurie labiausiai veikia proceso dinamines charakteristikas. Metantanko sienos turi platų izoliacinį sluoksnį, kad aplinkos temperatūra kuo mažiau veiktų biotechnologinį procesą. Įtekančio dumblo tūrinis srautas ir temperatūra labiausiai veikia metantanko biotechnologinį procesą. Įsisavinus metantanko proceso veikimą ir adaptyvaus valdymo metodus pradedamas valdymo sistemos projektavimas.

Iš pradžių sudaroma adaptyvaus valdymo sistemos struktūra, paremta stiprinimo numatymo metodu. Reguliatoriaus adaptacija numatoma nuo dviejų trikdančių poveikių (įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros).



3.1 pav. Projektuojamos metantanko valdymo sistemos struktūra

Remiantis šia valdymo sistemos struktūra atliekami tokie veiksmai:

1. sudaromas proceso modelis ir identifikuojami modelio parametrai;
2. sudaromos, proceso dinaminių parametų (stiprinimo koeficiento, laiko pastoviosios) priklausomybės nuo trikdančių poveikių, polinominės lygtys;
3. parenkamas reguliatoriaus tipas ir reguliatoriaus derinimo taisyklės.

### 3.1 Metantanko technologinio proceso matematinio modelio realizavimas *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje

Prieš sudarant proceso modelį *MATLAB* programiniame pakete būtina susirinkti kuo tikslesnius proceso parametrus, kad sudarytas modelis būtų kuo labiau panašesnis į modeliuojamą procesą. *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje modeliuojamas metantanko procesas, kuris buvo aprašytas ankstesniuose skyreliuose. Naudojami proceso įėjimai ir išėjimai pateikti 3.1 ir 3.2 lentelėse.

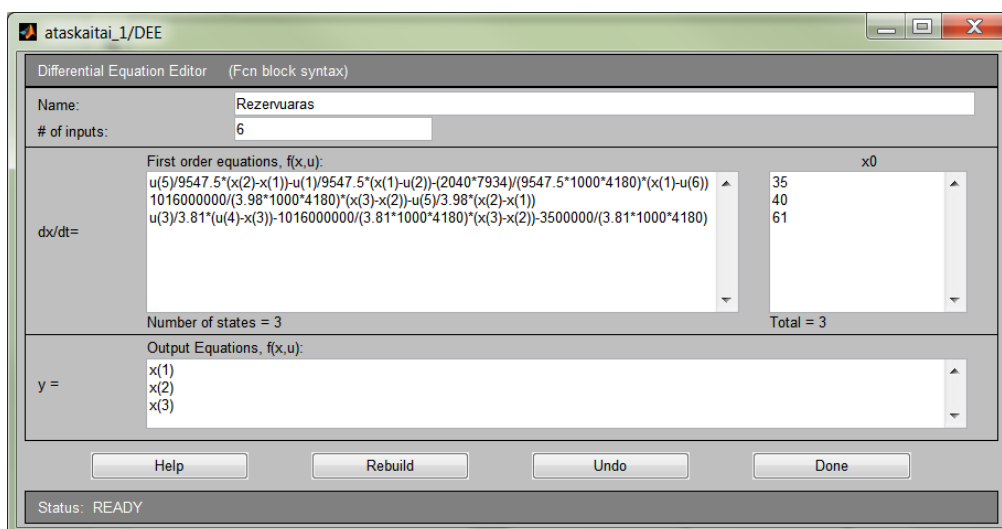
3.1 lentelė. Metantanko proceso įėjimai

Kintamasis	Aprašymas	Įėjimas
$F_{in}$	Metantanko įtekančio dumblo srautas	u(1)
$T_{in}$	Metantanko įtekančio dumblo temperatūra	u(2)
$F_w$	Šildymo energiją tiekiantis vandens srautas, cirkuliuojantis per šilumokaitį	u(3)
$T_{w,in}$	Šilumokaičio įtekančio vandens temperatūra	u(4)
$F_h$	Metantanko dumblo, cirkuliuojamo per šilumokaičio sistemą, srautas	u(5)
$T_{od}$	Lauko temperatūra	u(6)

3.2 lentelė. Metantanko proceso išėjimai

Kintamasis	Aprašymas	Išėjimas
$T_s$	Metantanko dumblo temperatūra	x(1)
$T_h$	Metantanko dumblo, cirkuliuojamo per šilumokaičio sistemą, temperatūra	x(2)
$T_{w,out}$	Šilumokaičio ištekančio vandens temperatūra	x(3)

Modelis aprašomas naudojant jau sukurtas tris būsenų lygtis (1, 2, 3). Modeliui aprašyti naudojamas *DEE* elementas, kuris pateiktas 3.2 pav. Nurodomi proceso įėjimai / išėjimai, nustatomos pradinės sąlygos.



3.2 pav. Modelio lygčių integravimo blokas *DEE*

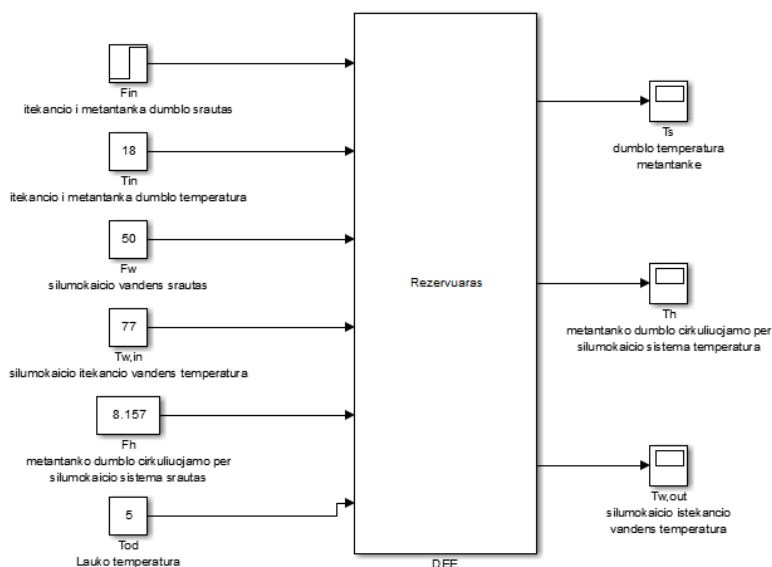
Sudarius metantanko modelį *SIMULINK* aplinkoje priskiriami įėjimų ir išėjimų blokai. Žinoma, kad rūgimui geriausios sąlygos pasiekiamos, kai metantanko dumblo temperatūra 35 °C.

Nominalūs metantanko technologinio proceso parametrai:

$F_w$  (šildymo energiją tiekiantis vandens srautas, cirkuliuojantis per šilumokaitį) – 50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{w,in}$  (šilumokaičio įtekančio vandens temperatūra) – 77 °C,  $T_{od}$  (lauko temperatūra) – 5 °C.

Pradinės sąlygos:

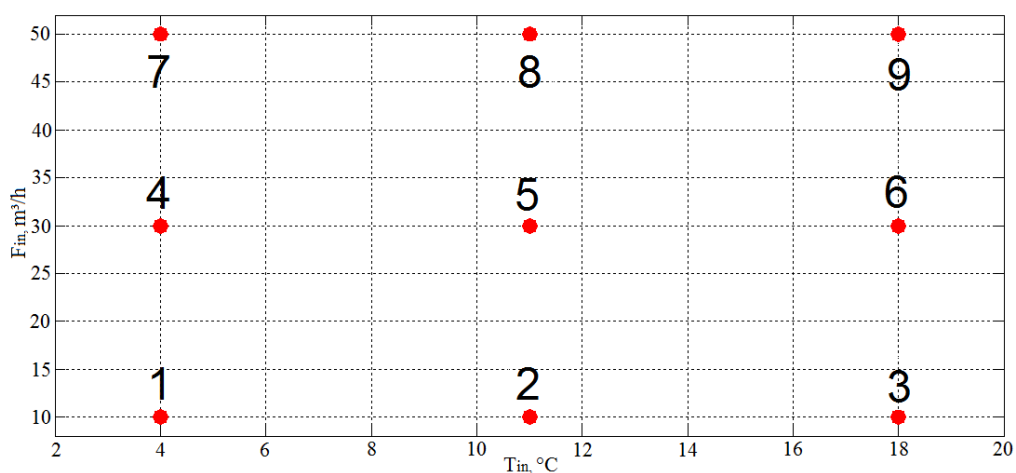
$T_s$  (metantanko dumblo temperatūra) – 35 °C,  $T_h$  (metantanko dumblo, cirkuliuojamo per šilumokaičio sistemą, temperatūra) – 40 °C,  $T_{w,out}$  (šilumokaičio ištekančio vandens temperatūra) – 61 °C.



3.3 pav. Metantanko proceso modeliujami įėjimo ir išėjimo parametrai

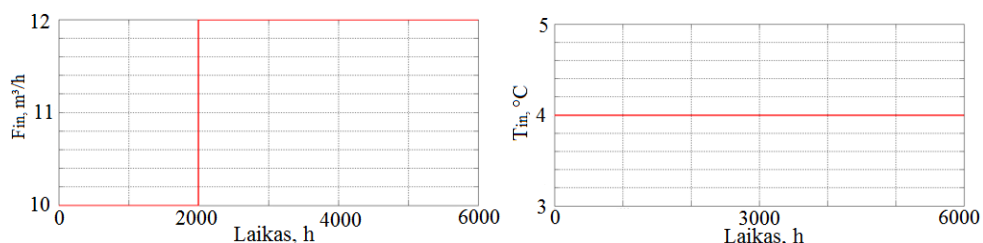
### 3.2 Modeliavimo eksperimentai, skirti ištirti įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros įtaką proceso dinaminiam parametrams

Keičiant įtekančio dumblo temperatūrą  $T_{in}$  ir srautą  $F_{in}$  atliekami modeliavimo eksperimentai. Naudojamas atviro kontūro modelis, kuris anksčiau pateiktas 3.3 pav. Eksperimentai modeliujami taip, kad prieš įtekančio srauto šuolį metantanko dumblo temperatūra yra lygi 35 °C. Nominalūs metantanko technologinio proceso parametrai ir pradinės sąlygos yra aprašytos ankstesniuose skyreliuose. Iš viso atlikti devyni modeliavimo eksperimentai naudojant skirtingus išorinius poveikius, kurie pateikti 3.4 pav.



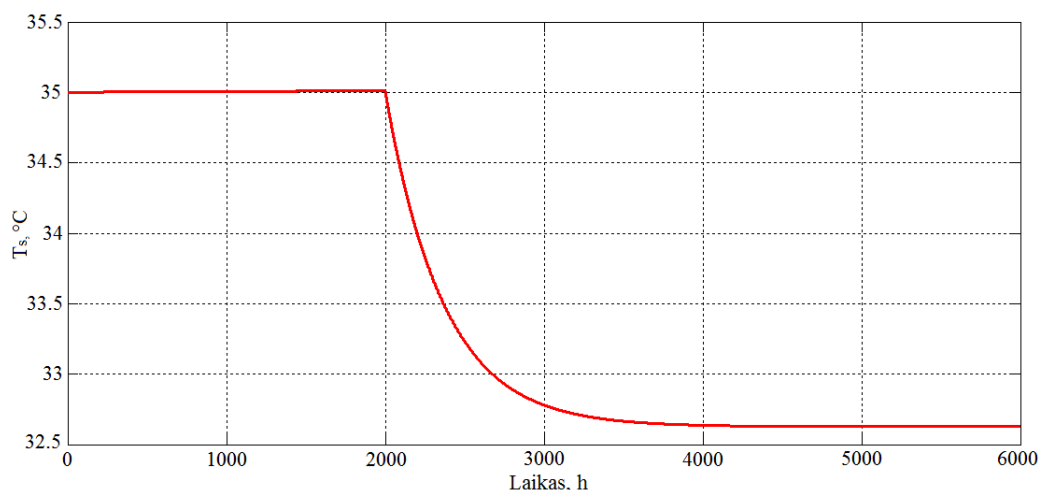
**3.4 pav.** Modeliavimo eksperimentų planas

Detaliau aprašomas pirmu numeriu (žr. 3.4 pav.) pažymėtas modeliavimo eksperimentas. Šio eksperimento metu paduodamas įtekančio dumblo  $F_{in}$  šuolinis pokytis (10-12 m³/h, 4 °C), kuris pavaizduotas 3.5 pav.



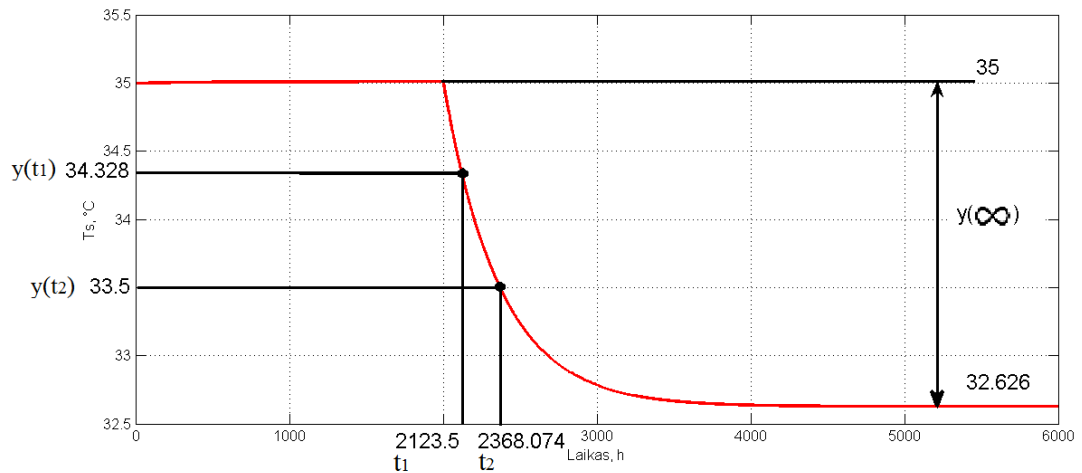
**3.5 pav.** Metantanko įtekančio dumblo tūrinio srauto  $F_{in}$  šuolis (nuo 10 iki 12 m³/h, temperatūra 4 °C)

Trikdančio poveikio šuolis įvykdytas 2000 h, kai proceso reakcija yra nusistovėjusi 35 °C. Metantanko dumblo temperatūros pereinamojo proceso reakcija  $T_s$  pavaizduota 3.6 pav.



**3.6 pav.** Metantanko dumblo temperatūros  $T_s$  reakcija į trikdžio  $F_{in}$  šuolį (nuo 10 m³/h iki 12 m³/h, 4 °C)

*C.L.Smith* metodas naudojamas proceso laiko pastoviajai  $T_{pr}$  ir stiprinimo koeficientui  $K_{pr}$  apskaičiuoti (žr. 3.7 pav.) [5].



**3.7 pav.** Dinaminių parametų nustatymas naudojant *C.L.Smith* metodą [5]

Skaičiavimai pateikti žemiau:

$$y(\infty) = 35 - 32,626 = 2,374 ,$$

$$y(t_1) = 0,283 * y(\infty) = 0,672 ,$$

$$y(t_2) = 0,632 * y(\infty) = 1,5 ,$$

$$y(t_1) = 35 - 0,672 = 34,328 ,$$

$$y(t_2) = 35 - 1,5 = 33,5 .$$

Iš reakcijos kreivės nustatoma:  $t_1 = 2123,5$ ,  $t_2 = 2368,074$ .

$$\text{Laiko pastovioji [5]: } T = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) = 366,861. \quad (4)$$

$$\text{Stiprinimo koeficientas [5]: } K = \frac{y(\infty)}{\Delta u} = 1,187. \quad (5)$$

Atlikti modeliavimo eksperimentai naudojant planą (žr. 3.4 pav.) su skirtingais metantanko įtekančio dumblo srautų  $F_{in}$  kiekiais ir temperatūromis  $T_{in}$ . Kiekvieno skirtingo  $F_{in}$  tūrinio srauto vertei yra modeliuojamas skirtingas valdantis poveikis  $F_h$ , kad temperatūra  $T_s$  būtų pastovi (35 °C) ir atitiktų realų procesą. Taip pat, naudojant *C.L.Smith* metodą apskaičiuojami dinaminiai parametrai: laiko pastovioji ir stiprinimo koeficientas. Duomenys pateikti 3.3 lentelėje.

**3.3 lentelė.** Modeliavimo būdu, naudojant *C.L.Smith* metodą, apskaičiuoti proceso dinaminiai parametrai

$F_{in}$ (trikdis) m <sup>3</sup> /h	$T_{in}$ °C	$F_h$ (valdantis poveikis) m <sup>3</sup> /h	$T$ (laiko pastovioji) h	$K$ (stiprinimas)
10-12	4	13,45	366,861	1,187
10-12	11	10,67	392,157	0,983
10-12	18	8,157	421,106	0,749
30-32	4	62,43	157,096	0,51
30-32	11	38,33	171,554	0,43
30-32	18	23,29	187,415	0,335
50-52	4	922	100,244	0,325
50-52	11	128,5	109,584	0,275
50-52	18	51,72	121,371	0,215



Remiantis modeliavimo eksperimentų duomenimis nustatoma, kad proceso laiko pastovioji ir stiprinimo koeficientas labai skiriasi pakeitus trikdantį poveikį  $F_{in}$ , kai temperatūra  $T_{in}$  yra pastovi. Laiko pastovioji  $T = 366,861$  h, kai įtekantis dumblo tūrinis srautas  $F_{in} = 10$  m<sup>3</sup>/h, o laiko pastovioji  $T = 157,096$  h, kai  $F_{in} = 30$  m<sup>3</sup>/h. Skirtumas tarp minėtų laiko pastoviųjų yra reikšmingas 209,765. Laiko pastoviųjų skirtumas yra mažesnis, kai trikdančio poveikio srautų  $F_{in}$  kiekiai yra didesni. Laiko pastoviųjų skirtumas  $T = 56,852$ , kai trikdantis poveikis  $F_{in} = 30$  m<sup>3</sup>/h ir 50 m<sup>3</sup>/h, o temperatūra  $T_{in} = 4$  °C.

Stiprinimo koeficientų skirtumas, kai trikdantis poveikis  $F_{in} = 10$  m<sup>3</sup>/h ir 30 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in} = 4$  °C, yra didelis 0,677. Skirtumas mažesnis 0,185, kai  $F_{in} = 30$  m<sup>3</sup>/h ir 50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in} = 4$  °C. Dėl metantanko proceso dinaminių parametrų reikšmingų skirtumų skirtingose darbo būsenose būtina taikyti valdymo sistemoje adaptacijos algoritmą.

### 3.3 Aproximuojančių polinomų $T = f(F_{in}, T_{in})$ , $K = f(F_{in}, T_{in})$ , kurie leidžia įvertinti dinaminių parametrų priklausomybę nuo įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros, nustatymas

Pirmos eilės aperiodinės grandies perdavimo funkcijos parametrai pateikti 3.3 lentelėje. Šiais duomenimis remiantis yra apskaičiuojamos polinominės lygtys:  $T = f(F_{in}, T_{in})$ ,  $K = f(F_{in}, T_{in})$ . Detaliau pateikti polinominės lygties  $T = f(F_{in}, T_{in})$ , kuri skirta nustatyti ryšį tarp laiko pastoviosios, metantanko įtekančio dumblo tūrinio srauto  $F_{in}$  ir temperatūros  $T_{in}$ , skaičiavimai.

Naudojama universali mažiausių kvadratų formulė [4]:

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = (F^T F)^{-1} * F^T * Y . \quad (6)$$

Sudaromos matricos: n epriklausomų kintamųjų matrica  $F_{in}$  ir išėjimo arba stebėsenos matrica  $Y$  (laiko pastoviosios):

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 4 & 10*4 & 10^2 & 4^2 \\ 1 & 10 & 11 & 10*11 & 10^2 & 11^2 \\ 1 & 10 & 18 & 10*18 & 10^2 & 18^2 \\ 1 & 30 & 4 & 30*4 & 30^2 & 4^2 \\ 1 & 30 & 11 & 30*11 & 30^2 & 11^2 \\ 1 & 30 & 18 & 30*18 & 30^2 & 18^2 \\ 1 & 50 & 4 & 50*4 & 50^2 & 4^2 \\ 1 & 50 & 11 & 50*11 & 50^2 & 11^2 \\ 1 & 50 & 18 & 50*18 & 50^2 & 18^2 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 366,861 \\ 392,157 \\ 421,106 \\ 157,096 \\ 171,554 \\ 187,415 \\ 100,244 \\ 109,584 \\ 121,371 \end{pmatrix} . \quad (7)$$

Sudaroma polinominė lygtis:

$$T = f(F_{in}, T_{in}) = a_0 + a_1 F_{in} + a_2 T_{in} + a_3 F_{in} T_{in} + a_4 F_{in}^2 + a_5 T_{in}^2 \quad (8)$$

*MATLAB* programiniame pakete aprašytos nepriklausomų kintamųjų  $F_{in}$  ir išėjimo  $Y$  matricos:

```
F=[1, 10, 4, 10*4, 10^2, 4^2; 1, 10, 11, 10*11, 10^2, 11^2; 1, 10, 18, 10*18, 10^2, 18^2; 1, 30, 4, 30*4, 30^2, 4^2; 1, 30, 11, 30*11, 30^2, 11^2; 1, 30, 18, 30*18, 30^2, 18^2; 1, 50, 4, 50*4, 50^2, 4^2; 1, 50, 11, 50*11, 50^2, 11^2; 1, 50, 18, 50*18, 50^2, 18^2]
Y=[366.861; 392.157; 421.106; 157.096; 171.554; 187.415; 100.244; 109.584; 121.371]
```

Apskaičiuota  $A$  matrica:

$$A = (F^T * F)^{-1} * F^T * Y$$

$A =$

```
519,0077
-18,4037
3,7292
-0,0591
0,1997
0,0255
```

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = (F^T F)^{-1} * F^T * Y = \begin{pmatrix} 519,0077 \\ -18,4037 \\ 3,7292 \\ -0,0591 \\ 0,1997 \\ 0,0255 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Taigi polinominė lygtis  $T = f(F_{in}, T_{in})$ :

$$T = f(F_{in}, T_{in}) = 519.0077 - 18.4037 F_{in} + 3.7292 T_{in} - 0.0591 F_{in} T_{in} + 0.1997 F_{in}^2 + 0.0255 T_{in}^2 \quad (10)$$

Tokiu pat principu apskaičiuota polinominė lygtis  $K = f(F_{in}, T_{in})$ :

$$K = f(F_{in}, T_{in}) = 1.7611 - 0.0536 F_{in} - 0.0307 T_{in} + 0.0006 F_{in} T_{in} + 0.0005 F_{in}^2 - 0.0002 T_{in}^2 \quad (11)$$

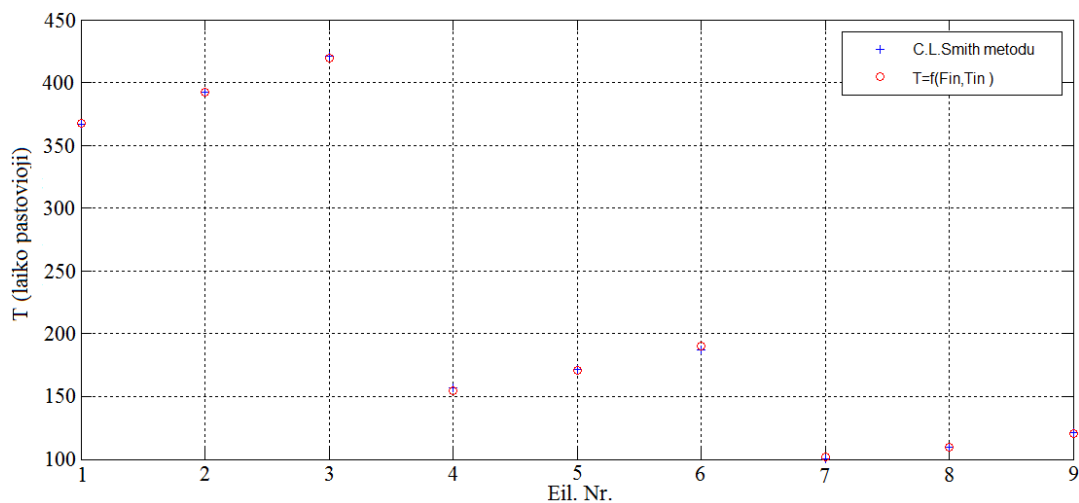
### 3.4 Dinaminių parametų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominių lygčių, palyginimas

Modelio dinaminiai parametrai, apskaičiuoti naudojant *C.L.Smith* metodą (3.2 skyrelis) ir polinomines lygtis  $T = f(F_{in}, T_{in})$ ,  $K = f(F_{in}, T_{in})$  (3.3 skyrelis), pateikti 3.4 lentelėje.

**3.4 lentelė.** Laiko pastoviųjų ir stiprinimo koeficientų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominių lygčių, palyginimas

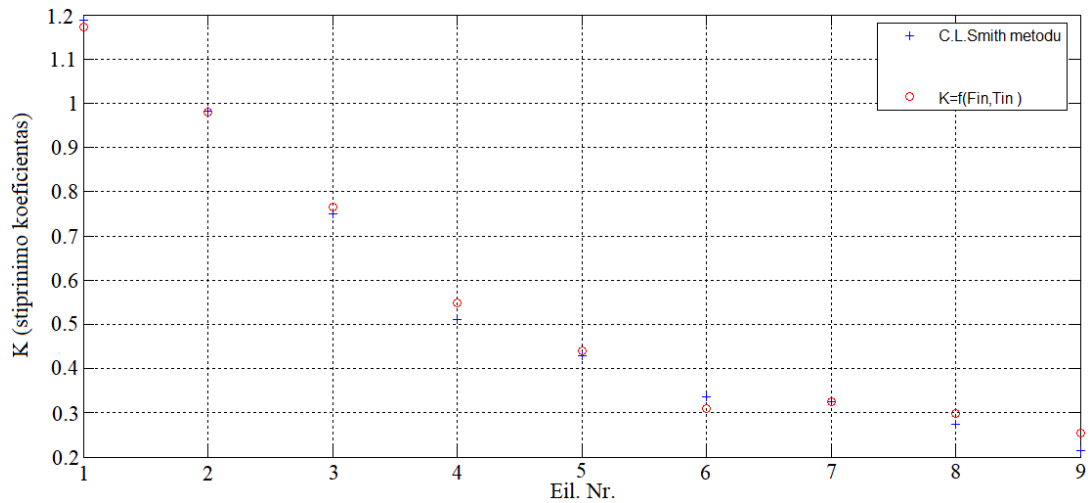
Eil. Nr.	$F_{in}$ (trikdis), m <sup>3</sup> /h	$T_{in}$ °C	$F_h$ (valdantis poveikis) m <sup>3</sup> /h	$T$ (laiko pastovioji) C.L.Smith metodas h	$T$ (laiko pastovioji) Polinominė lygtis h	$K$ (stiprinimo koeficientas) C.L.Smith metodas	$K$ (stiprinimo koeficientas) Polinominė lygtis
1	10-12	4	13,45	366,861	367,9015	1,187	1,1731
2	10-12	11	10,67	392,157	392,5464	0,983	0,9792
3	10-12	18	8,157	421,106	419,6903	0,749	0,7657
4	30-32	4	62,43	157,096	154,8595	0,51	0,5491
5	30-32	11	38,33	171,554	171,2304	0,43	0,4392
6	30-32	18	23,29	187,415	190,1003	0,335	0,3097
7	50-52	4	922	100,244	101,5775	0,325	0,3251
8	50-52	11	128,5	109,584	109,6744	0,275	0,2992
9	50-52	18	51,72	121,371	120,2703	0,215	0,2537

Laiko pastoviųjų palyginimo rezultatai rodo gerą eksperimentinių ir prognozuojamų rezultatų sutapimą. Laiko pastoviosios prognozavimo vidutinė absoliutinė nuokrypa – 1,179, o vidutinė santykinė nuokrypa – 0,67 %. Laiko pastoviųjų mažiausias skirtumas – 0,0904 (8 eksperimentas), o didžiausias skirtumas – 2,6853 (6 eksperimentas). Vaizdžiau laiko pastoviųjų vertes atvaizduoja 3.8 pav.



**3.8 pav.** Laiko pastoviųjų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominės lygties  $T = f(F_{in}, T_{in})$ , palyginimas

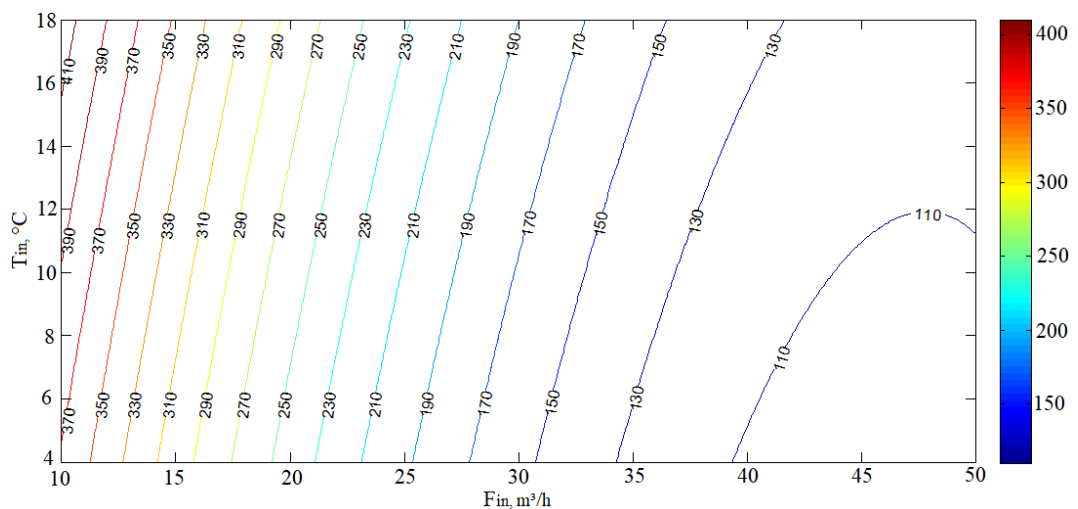
Stiprinimo koeficientų palyginimo rezultatai, taip pat, rodo gerą eksperimentinių ir prognozuojamų rezultatų sutapimą. Stiprinimo koeficiento prognozavimo vidutinė absoliutinė nuokrypa – 0,019, o vidutinė santykinė nuokrypa – 5,33 %. Mažiausia absoliutinė nuokrypa – 0,0001 (7 eksperimentas), o didžiausia – 0,0391 (4 eksperimentas). Vaizdžiau stiprinimo koeficientų vertes atvaizduoja 3.9 pav.



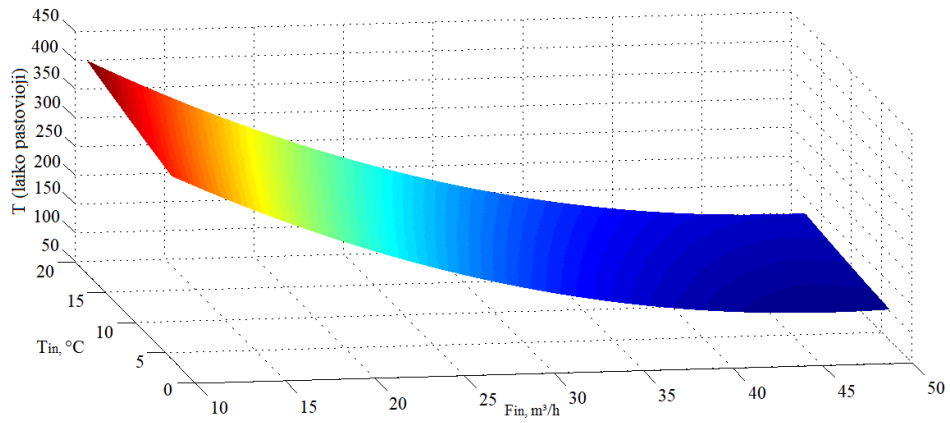
**3.9 pav.** Stiprinimo koeficientų, apskaičiuotų iš modeliavimo eksperimentų ir polinominės lygties  $K = f(F_{in}, T_{in})$ , palyginimas

### 3.5 Tiriama proceso dinaminiai parametrai prognozavimas

Dinaminiai parametrai prognozuojami matuojant metantanko įtekančio dumblo tūrinį srautą  $F_{in}$  ir temperatūrą  $T_{in}$ . 3.10 pav. pavaizduotas laiko pastoviosios prognozavimas naudojant polinominę lygtį  $T = f(F_{in}, T_{in})$ . Iš šio paveikslo pastebima, kad didinant įtekančio dumblo  $F_{in}$  srautą, laiko pastovioji mažėja, o didinant įtekančio dumblo temperatūrą  $T_{in}$  – didėja. Programos kodas nurodytas 1 priede.

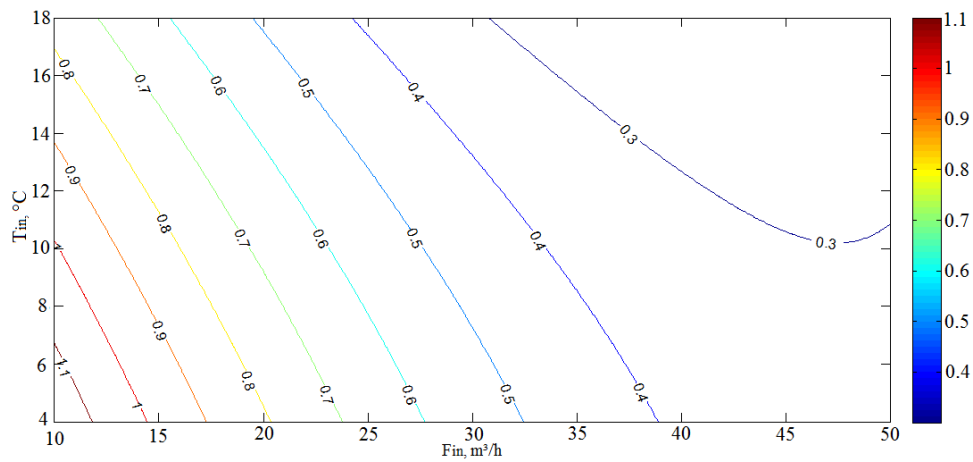


**3.10 pav.** Laiko pastoviosios prognozavimas naudojant polinominę lygtį  $T = f(F_{in}, T_{in})$ , reakcijos paviršiaus atvaizdavimas izolinijomis

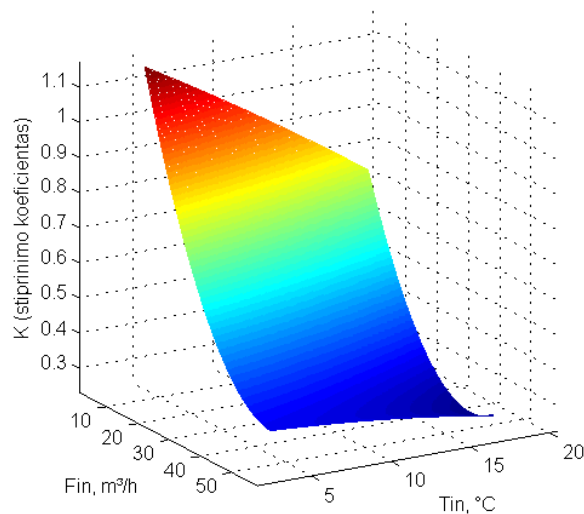


3.11 pav. Laiko pastoviosios prognozavimas,  $T = f(F_{in}, T_{in})$  reakcijos paviršius

3.12 paveiksle pavaizduotas stiprinimo koeficiento prognozavimas naudojant polinominę lygtį  $K = f(F_{in}, T_{in})$ . Iš šio paveikslo nustatoma, kad didinant įtekančio dumblo  $F_{in}$  srautą ir temperatūrą  $T_{in}$  stiprinimo koeficientas mažėja. Programos kodas nurodytas 2 priede.



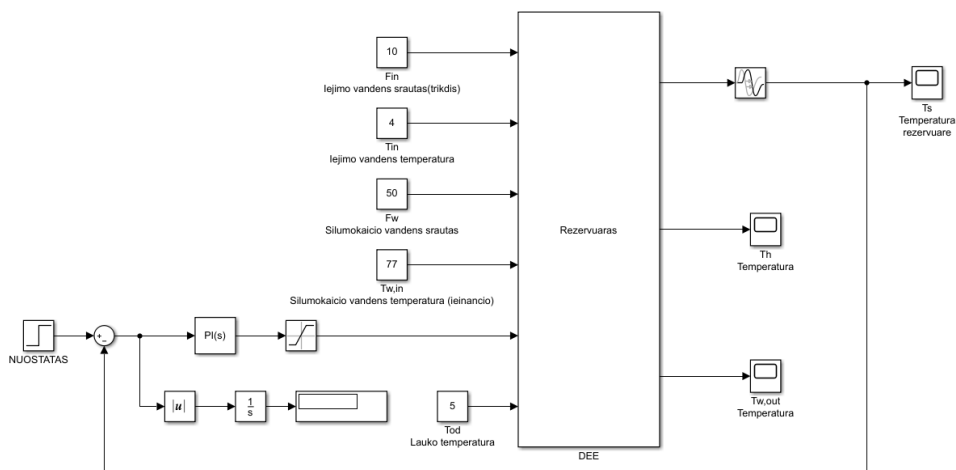
3.12 pav. Stiprinimo koeficiento prognozavimas naudojant polinominę lygtį  $K = f(F_{in}, T_{in})$ , reakcijos paviršiaus atvaizdavimas izolinijomis



3.13 pav. Stiprinimo koeficiento prognozavimas,  $K = f(F_{in}, T_{in})$  reakcijos paviršius

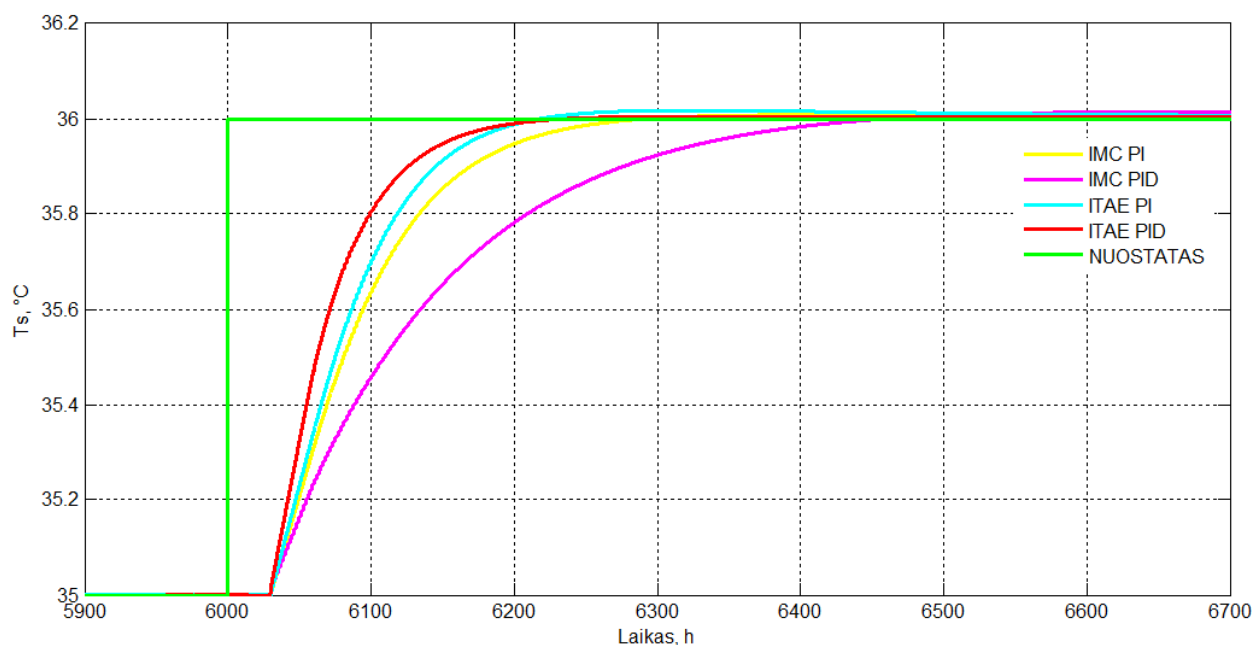
### 3.6 Temperatūros nuostato sekimo palyginimas naudojant reguliatoriaus IMC ir ITAE derinimo metodus

Nuostato sekimo eksperimentas atliekamas suderinus reguliatorių pagal pirmo modeliavimo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C). *PI* ir *PID* reguliatoriai suderinti naudojant *IMC* (angl. *internal model control*), *ITAE* (angl. *minimizing integral of time-weighted absolute error*) metodus [5]. Modelis pateiktas 3.14 pav.



3.14 pav. Vienkontūrė valdymo sistema nuostato sekimui

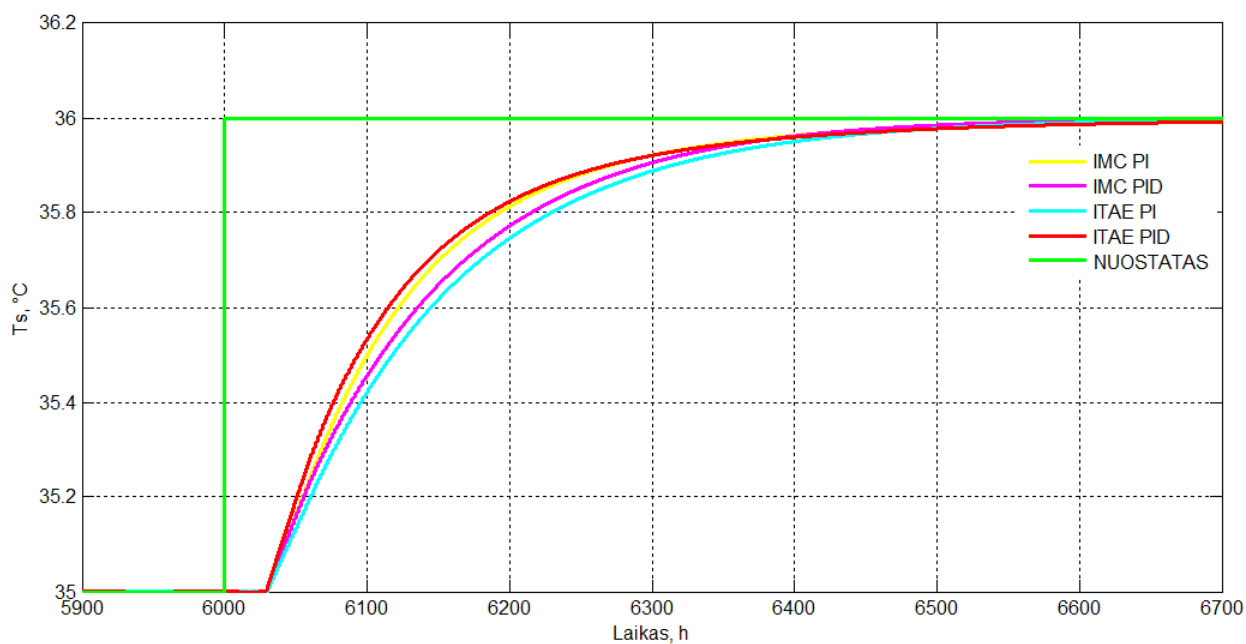
Šiame modelyje metantanko temperatūra pakeičiama nuo 35 °C iki 36 °C (6000 h). Gautos metantanko dumblo temperatūros pereinamojo proceso reakcijos pavaizduotos 3.15 pav.



3.15 pav. Temperatūros nuostato sekimas naudojant *IMC* ir *ITAE* metodais suderintą reguliatorių ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C)

Geriausi temperatūros reakcijos kokybės parametrai gauti naudojant nuostato sekimo *ITAE PID* metodo formules, blogiausi – suderinus reguliatorių *IMC PID* metodu.

Atliekamas kitas temperatūros nuostato sekimo eksperimentas. Naudojami devinto modeliavimo eksperimento išoriniai poveikiai ( $F_{in}$  50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  18 °C).



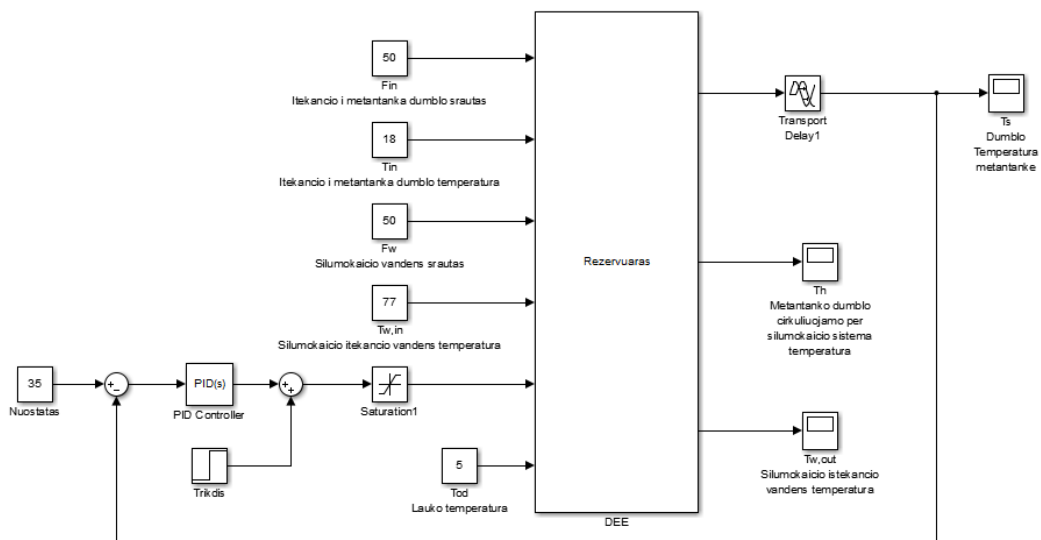
**3.16 pav.** Temperatūros nuostato sekimas naudojant *IMC* ir *ITAE* metodais suderintą reguliatorių ( $F_{in}$  50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  18 °C)

Naudojant devinto modeliavimo eksperimento išorinius poveikius geriausi temperatūros reakcijos kokybės parametrai gauti *PID* reguliatorių suderinus *ITAE* metodu, blogiausi – *ITAE PI* metodu.

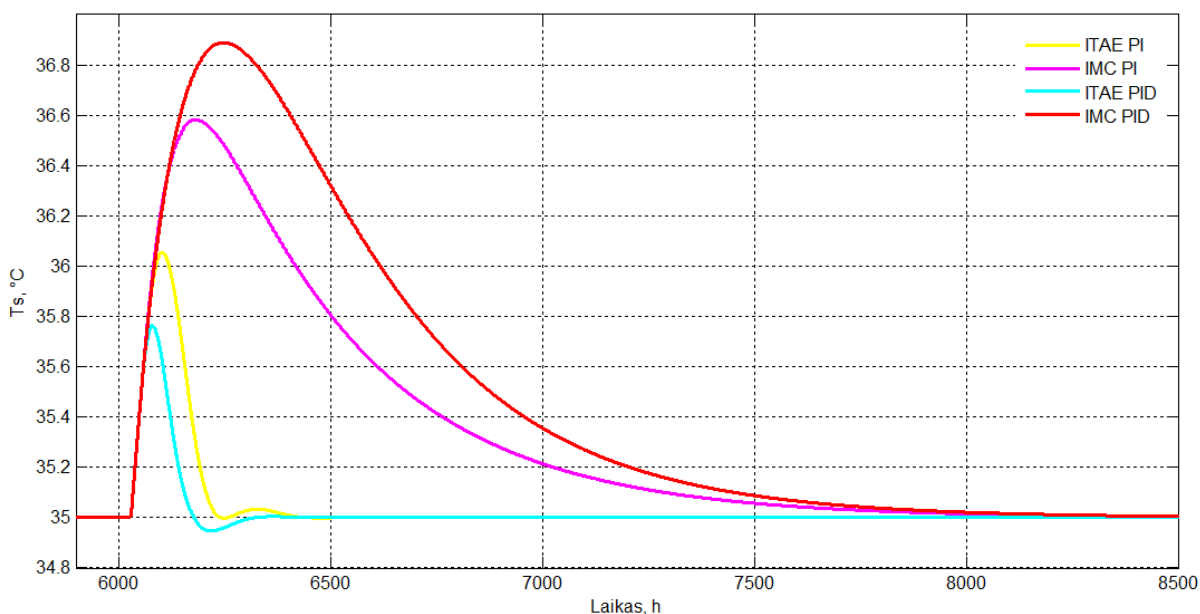
Tolesniuose nuostato sekimo eksperimentuose naudojamas *PID* reguliatorius, kuris suderintas remiantis nuostato *ITAE* metodo formulėmis.

### 3.7 Trikdžio kompensavimo palyginimas naudojant reguliatoriaus IMC ir ITAE derinimo metodus

Trikdžio kompensavimo eksperimentas atliekamas suderinus reguliatorių pagal pirmo modeliavimo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C). Užduodama metantanko temperatūra – 35 °C. *PI* ir *PID* reguliatoriai suderinti naudojant *IMC* ir *ITAE* derinimo metodus. Šiam eksperimentui naudojamas modelis, kuris pavaizduotas 3.17 pav.



3.17 pav. Vienkontūrė valdymo sistema trikdžio kompensavimui

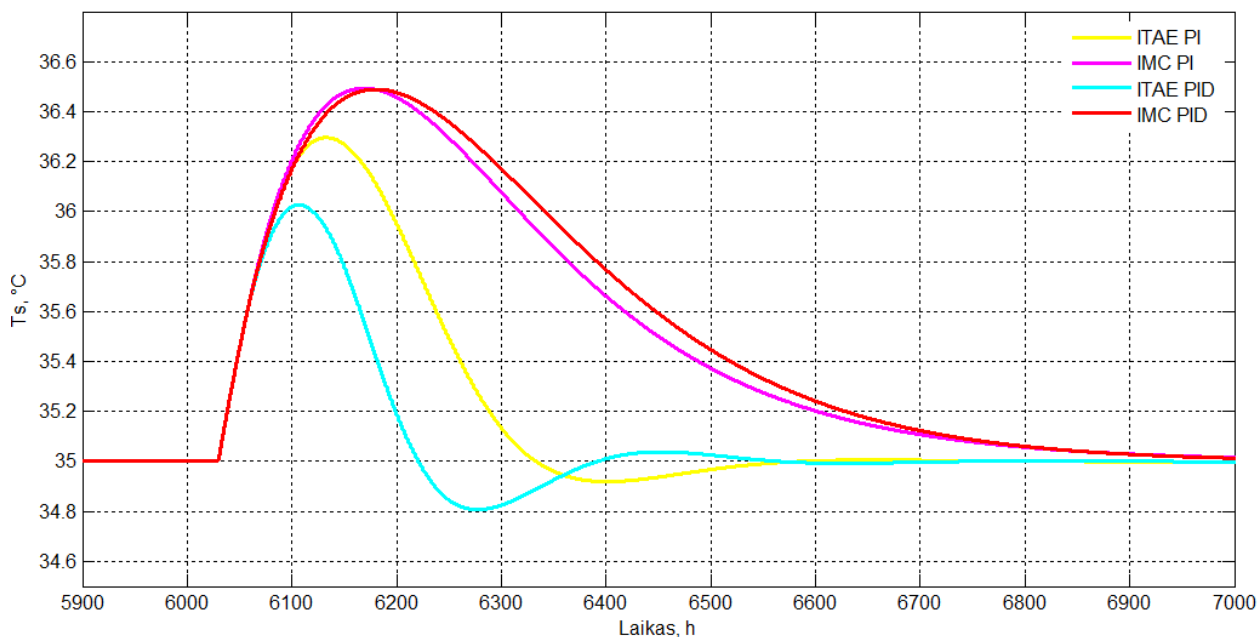


3.18 pav. Trikdžio kompensavimas naudojant *IMC* ir *ITAE* metodais suderintą reguliatorių ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C)

Geriausios reakcijos kokybės parametrai gauti naudojant trikdžio kompensavimo *ITAE PID* metodo formules, blogiausi – suderintus reguliatorių *IMC PID* metodu.



Kitas trikdžio kompensavimo eksperimentas atliekamas suderintus reguliatorių pagal devinto modeliavimo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ). *PI* ir *PID* reguliatoriai suderinti naudojant *IMC*, *ITAE* metodus (žr. 3.19 pav.).



**3.19 pav.** Trikdžio kompensavimas naudojant *IMC* ir *ITAE* metodais suderintą reguliatorių ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ )

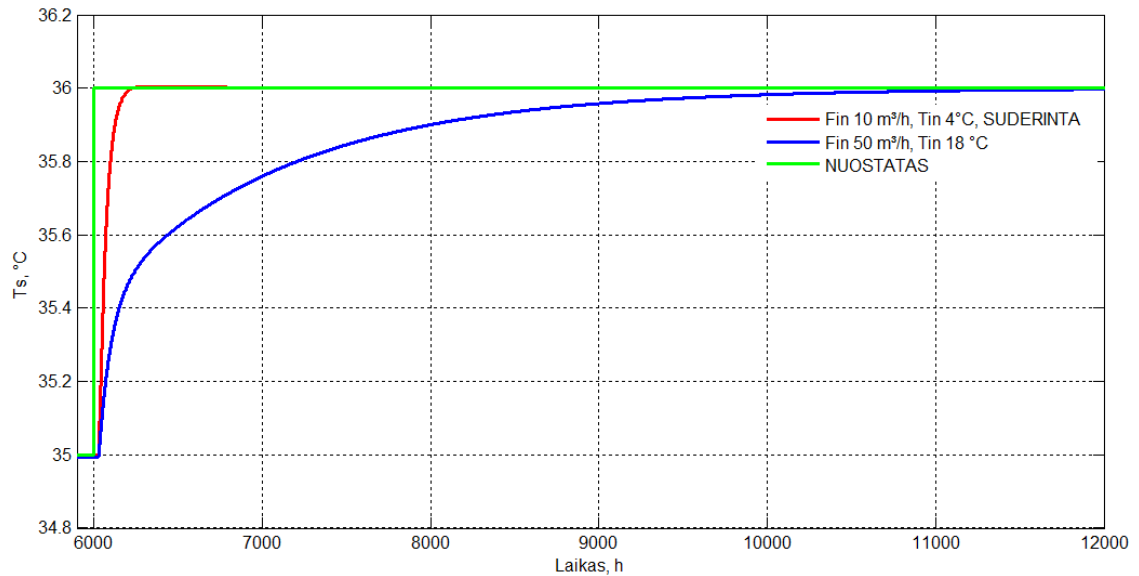
Naudojant devinto modeliavimo eksperimento išorinius poveikius geriausi reakcijos kokybės parametrai gauti *ITAE* metodu suderintus *PID* reguliatorių, blogiausi – *IMC* metodu suderintus *PID* reguliatorių.

Tolesniuose trikdžio kompensavimo eksperimentuose naudojamas *PID* reguliatorius, kuris suderintas remiantis trikdžio *ITAE* metodo formulėmis.

### 3.8 Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio tyrimas sekant nuostatą

Naudojant adaptacijos valdymo algoritmą reguliatoriaus parametrai perskaičiuojami polinominėmis lygtimis, atsižvelgiant į išorinius poveikius. Atliekamas tyrimas, kai reguliatorius yra suderinamas pagal vienus išorinius poveikius, vėliau išoriniai poveikiai yra pakeičiami, o reguliatoriaus parametrai išlieka pastovūs.

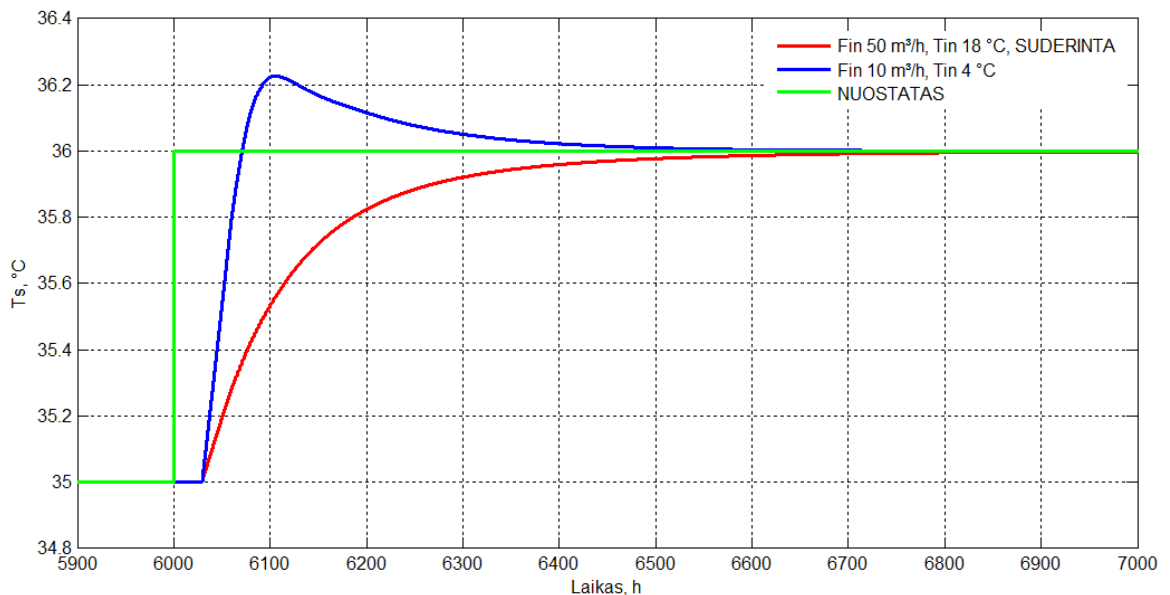
Temperatūros nuostato sekimui toliau naudojamas *ITAE PID* reguliatorius. Šis reguliatorius suderinamas pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Nepakeitus *PID* reguliatoriaus parametru į modelį paduodami devinto eksperimento išoriniai poveikiai ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pakeičiama metantanko temperatūra vienu laipsniu. Pereinamųjų procesų reakcijos pavaizduotos 3.20 pav.



**3.20 pav.** Adaptyvaus regulatoriaus poreikio įrodymas nuostato sekimui ( $F_{in} 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 4 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Suderintos reakcijos pereinamojo proceso trukmė – 126 h. Atlikus modeliavimą, kai *PID* reguliatorius suderintas pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o į modelį paduoti devinto eksperimento duomenys ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), gauta pereinamojo proceso trukmė – 1997 h. Jeigu reguliatorius *PID* suderintas pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius, o į sistemą būtų paduoti devinto eksperimento išoriniai poveikiai, nustatytą temperatūros reikšmę pasiektų 1871 h vėliau.

Panašus eksperimentas atliktas *PID* reguliatorių suderinus pagal devinto eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Pereinamojo proceso reakcijos pavaizduotos 3.21 pav.



**3.21 pav.** Adaptyvaus regulatoriaus poreikio įrodymas nuostato sekimui ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ )

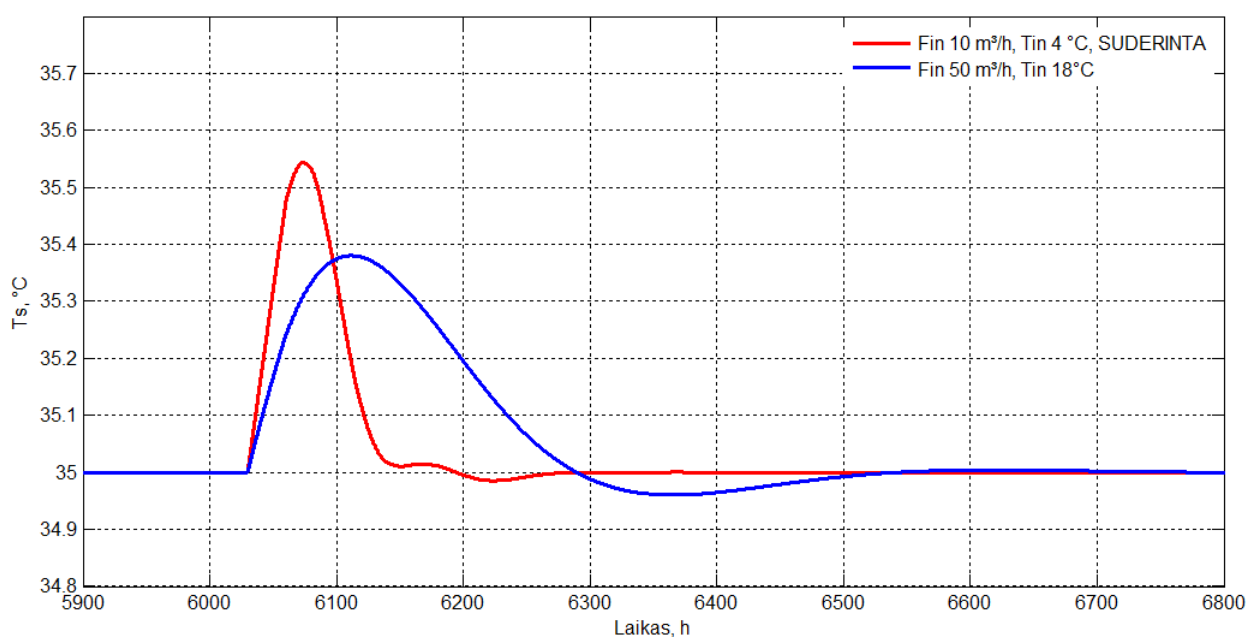
Suderintos reakcijos pereinamojo proceso trukmė – 268 h. Atlikus modeliavimą, kai *PID* reguliatorius suderintas pagal devinto eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o į modelį paduoti pirmo eksperimento duomenys ( $F_{in} 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), gauta pereinamojo proceso

trukmė artima suderintai reakcijai. Dėl maksimalaus perreguliavimo atsiradimo gali sumažėti mikroorganizmų aktyvumas skaidant dumblą.

### 3.9 Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio tyrimas kompensuojant trikdantį poveikį

Panašus adaptyvaus reguliatoriaus poreikio tyrimas kompensuojant trikdantį poveikį atliekamas šiame skyrelyje, lyginant su prieš tai aprašytu nuostato sekimo tyrimu (3.8 skyrelis), tik čia yra nekeičiamas nuostatas. Šiam eksperimentui naudojamas modelis pateiktas 3.14 pav. Nustatoma temperatūra metantanke – 35 °C, paduodamas įtekančio dumblo tūrinis srauto šuolis – 5 m<sup>3</sup>/h.

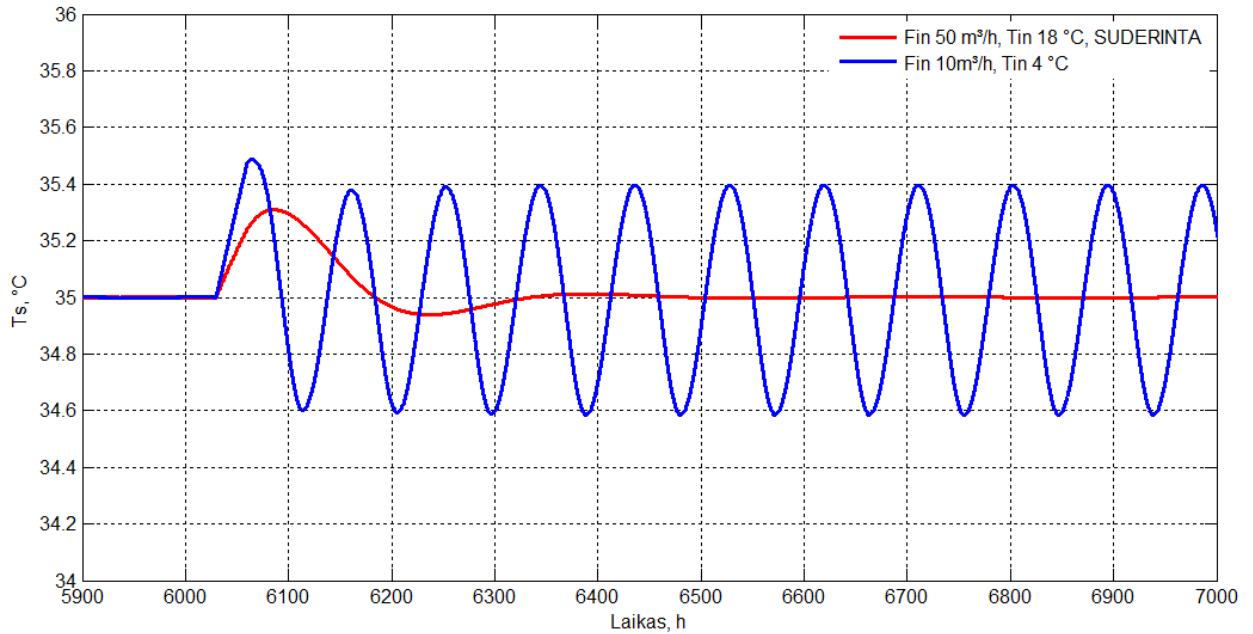
Suderinamas *PID* reguliatorius pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C). Tada, nepakeitus *PID* reguliatoriaus parametru, paduodami devinto eksperimento išoriniai poveikiai ( $F_{in}$  50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  18 °C). Metantanko temperatūros reakcijos kreivės pavaizduotos 3.22 pav.



3.22 pav. Adaptyvaus reguliatoriaus poreikio įrodymas trikdžio kompensavimui ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C)

Suderintos reakcijos pereinamojo proceso trukmė – 122 h. Nesuderintos metantanko temperatūros reakcijos pereinamojo proceso trukmė – 235 h. Jeigu *PID* reguliatorius suderintas pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius, o į sistemą būtų paduoti devinto eksperimento išoriniai poveikiai, nustatytą temperatūros reikšmę pasiektų 113 h vėliau.

Atliekamas kitas modeliavimo eksperimentas. Suderinamas *PID* reguliatorius pagal devinto eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in}$  50 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  18 °C). Nepakeitus *PID* reguliatoriaus parametru paduodami pirmo eksperimento išoriniai poveikiai ( $F_{in}$  10 m<sup>3</sup>/h,  $T_{in}$  4 °C). Metantanko temperatūros reakcijos kreivės pavaizduotos 3.23 pav.



**3.23 pav.** Adaptyvaus regulatoriaus poreikio įrodymas trikdžio kompensavimui ( $F_{in} 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 18 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Suderintos metantanko temperatūros reakcijos pereinamojo proceso trukmė – 154 h. Nesuderintos reakcijos kokybės rodikliai akivaizdžiai skiriasi. Atsiranda nuolatinės amplitudės svyravimai. Sistema yra stabili, tačiau nuolatiniai svyravimai yra nepageidaujami šiam procesui, nes reikia palaikyti temperatūrą, kuomet artimesnę  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.10 Diskretinio *PID* regulatoriaus pritaikymas

Praktikoje naudojami diskretiniai reguliatoriai, kuriuose yra tam tikras diskretinis žingsnis, nes tolydinį reguliatorių realizuoti yra sudėtinga. Dėl to kituose eksperimentuose yra naudojamas diskretinio regulatoriaus modelis, kuris nurodytas 3 priede. Šio regulatoriaus modelis sudarytas naudojant valdančio poveikio matematinę išraišką [5]:

$$\Delta u_n = K_r \left[ \left( 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right]; \quad (12)$$

čia  $\Delta u_n$  – valdantis pokytis;

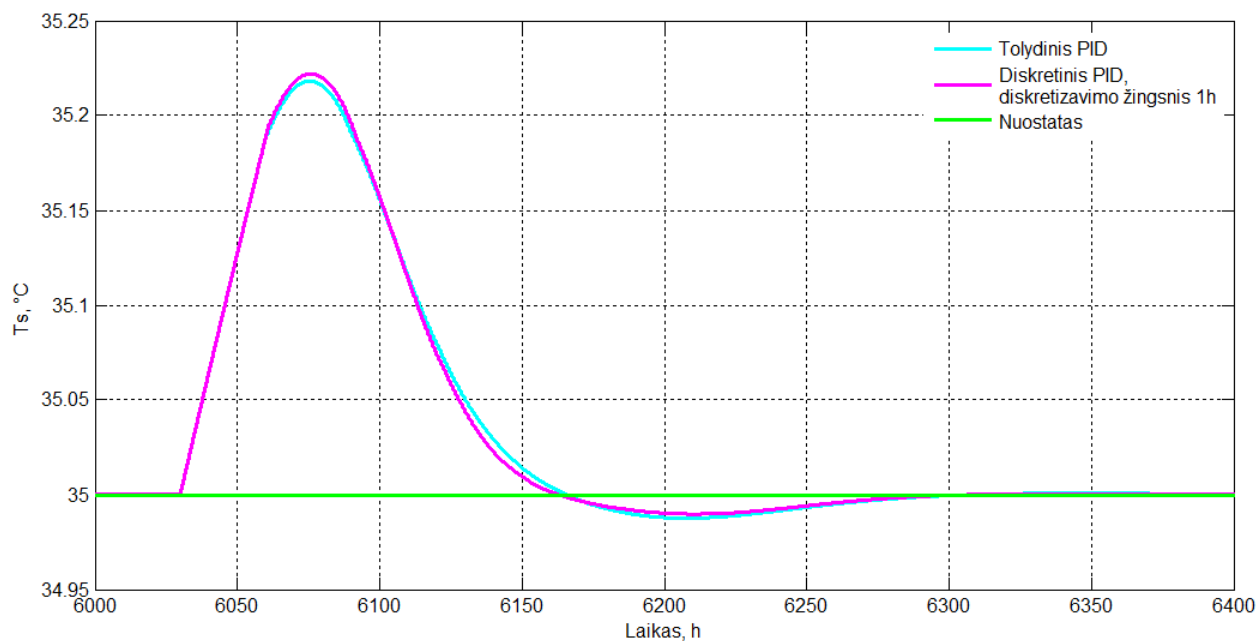
$K_r$  – stiprinimo koeficientas;

$T_i$  – integravimo laiko pastovioji;

$T_d$  – diferencijavimo laiko pastovioji;

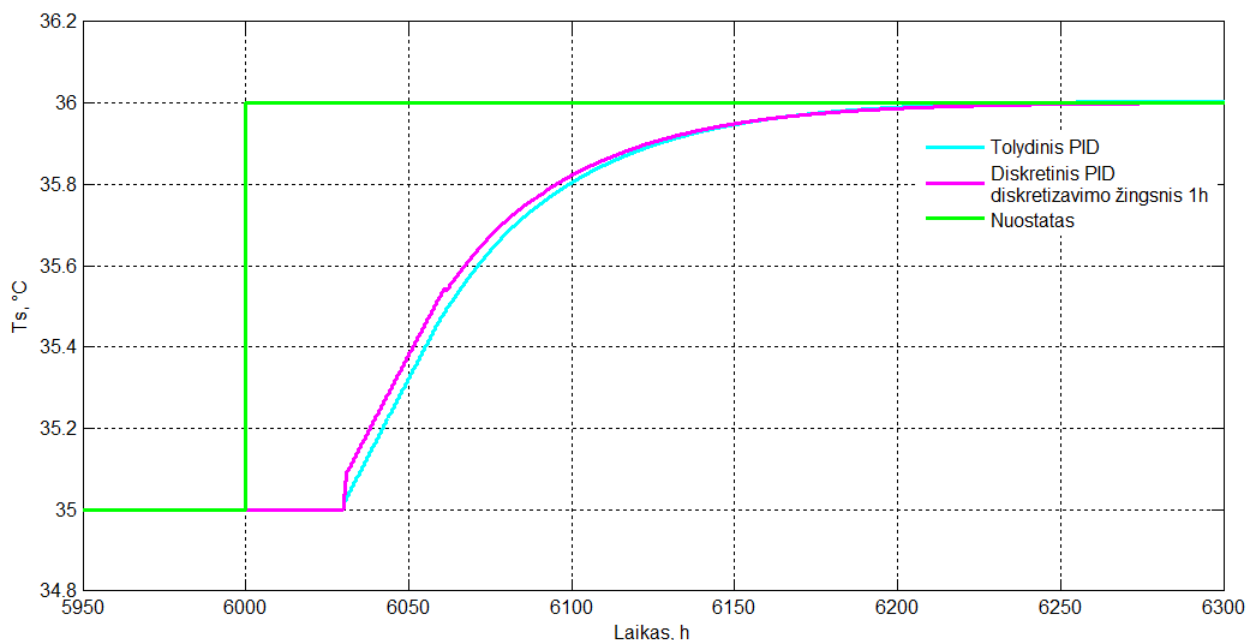
$T$  – diskretinis žingsnis.

Parinktas diskretinis žingsnis 1 h, prie kurio diskretinis reguliatorius apskaičiuoja artimus rezultatus tolydiniam reguliatoriui. Atliekami eksperimentai pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius ( $F_{in} 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{in} 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Metantanko dumblo temperatūros nuostatas palaikomas  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Įtekančio dumblo srautas sumažinamas šuoliškai  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  (nuo  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  iki  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ )  $6000 \text{ h}$ . Gautos trikdančio poveikio reakcijos pateiktos 3.24 pav.



**3.24 pav.** Metantanko temperatūros trikdžio kompensavimo reakcijos naudojant diskretinį ir tolydinį reguliatorius

Atliekamas kitas nuostato sekimo modeliavimo eksperimentas naudojant tą patį diskretinį žingsnį (1 h). Taip pat, *PID* reguliatorius suderintas pagal pirmo eksperimento išorinius poveikius. Įtekančio dumblo srauto ir temperatūros vertės pastovios tik keičiamas nuostatas nuo 35 °C iki 36 °C (6000 h). Gautas temperatūros nuostato sekimo reakcijos pateiktos 3.25 pav.



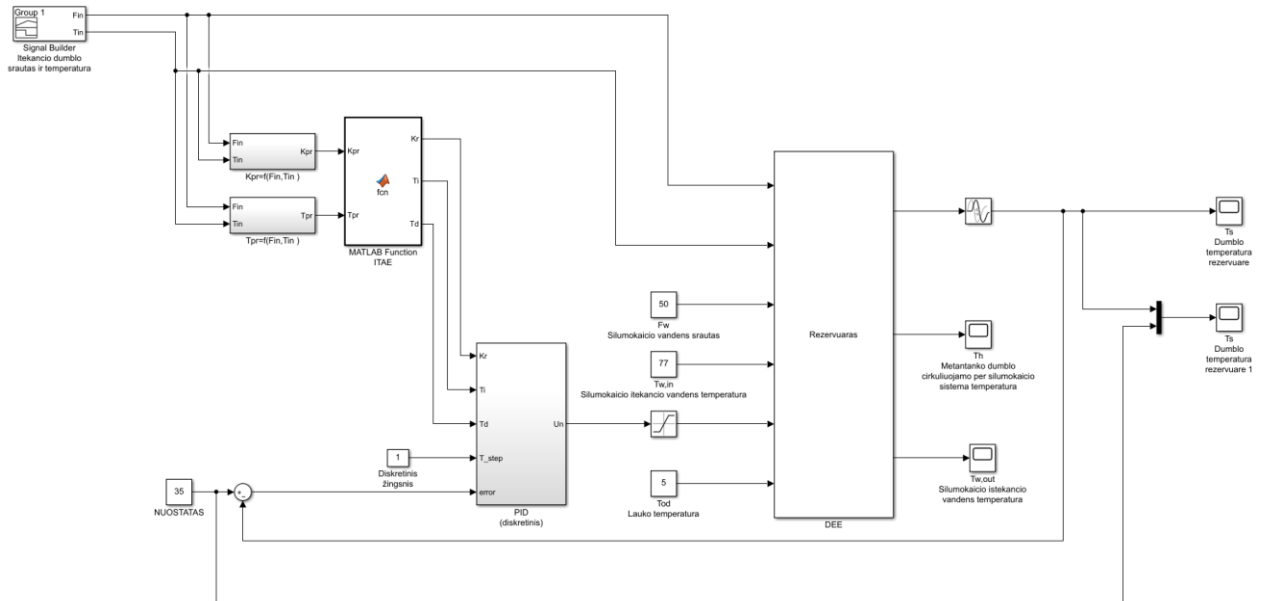
**3.25 pav.** Metantanko temperatūros nuostato sekimo reakcijos naudojant diskretinį ir tolydinį reguliatorius

Diskretinio reguliatoriaus reakcijos kokybės parametrai artimi tolydinio reguliatoriaus reakcijoms. Iš gautų rezultatų galima nustatyti diskretinio reguliatoriaus žingsnį 1 h.

## 4. Rezultatai

### 4.1 Adaptacijos valdymo algoritmo tyrimas kompensuojant trikdančius poveikius

Iš polinominių lygčių, matuojant įtekančio dumblo srautą ir temperatūrą, yra apskaičiuojami proceso parametrai: laiko pastovioji ir stiprinimo koeficientas. Toliau šie parametrai patenka į *MATLAB FUNCTION ITAE* bloką, kur gaunami *PID* reguliatoriaus parametrai naudojant *ITAE* derinimo metodą. Kintant įtekančio dumblo srautui ir temperatūrai yra perskaičiuojami *PID* reguliatoriaus parametrai, kurie leidžia gauti metantanko temperatūros reakcijos geriausius kokybės rodiklius. Metantanko adaptyvios valdymo sistemos modelis pateiktas 4.1 pav.



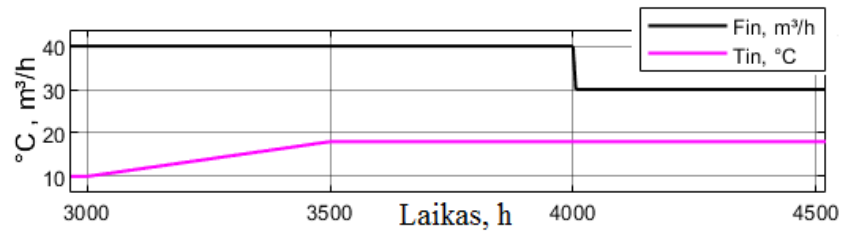
4.1 pav. Metantanko temperatūros adaptyvios valdymo sistemos modelis

Šiame modelyje *SIMULINK* programoje polinominės lygtys išreiškiamos *Subsystem* blokais: polinominė lygtis  $T = f(F_{in}, T_{in})$  nurodyta 4 priede, polinominė lygtis  $K = f(F_{in}, T_{in})$  nurodyta 5 priede.

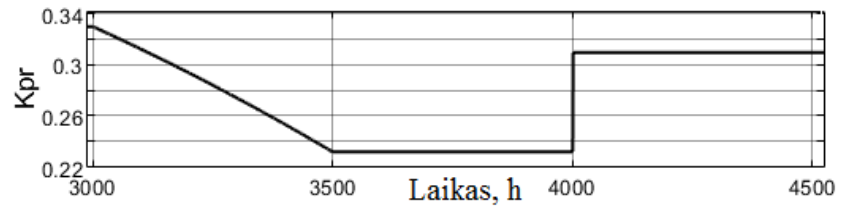
*MATLAB FUNCTION ITAE* bloke įvedamos *ITAE* derinimo metodo trikdžio formulės [5]:

```
function [Kr,Ti,Td] = fcn(Kpr,Tpr)
%#codegen
%ITAE PID metodas trikdžiui
vel=30;
Kr=(1.357/Kpr) * ((Tpr/vel)^0.947)
Ti=(Tpr/0.842) * ((vel/Tpr)^0.738)
Td=0.381*Tpr * ((vel/Tpr)^0.995)
```

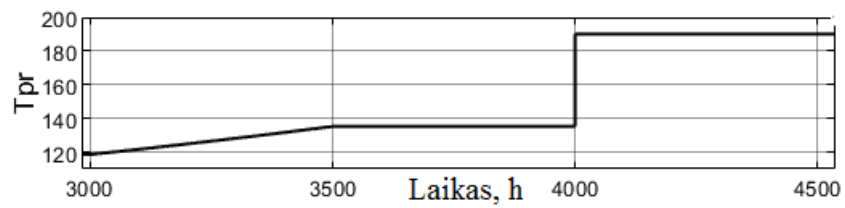
Į šį metantanko proceso modelį (4.1 pav.) paduodamas trikdantis įtekančio dumblo ir temperatūros signalas. Skirtingais laiko momentais keičiami trikdantys poveikiai: įtekančio dumblo temperatūra ir srauto greitis. Iš pradžių tiesiškai keičiama temperatūra nuo 10 °C (3000 h) iki 18 °C (3500 h). Vėliau šuoliškai sumažinamas (nuo 40 m<sup>3</sup>/h iki 30 m<sup>3</sup>/h) srauto greitis 4000 h. Išorinių poveikių signalas, proceso dinaminiai parametrai, adaptyvaus diskretinio reguliatoriaus parametrai ir metantanko temperatūros reakcija pavaizduoti 4.2 pav.



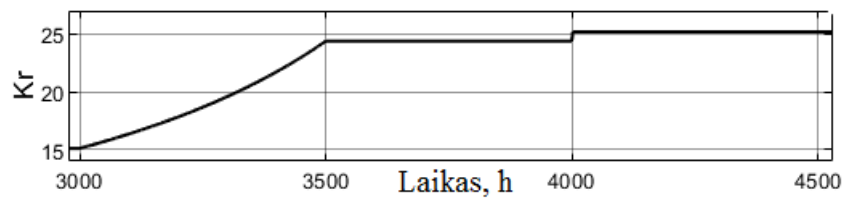
a)



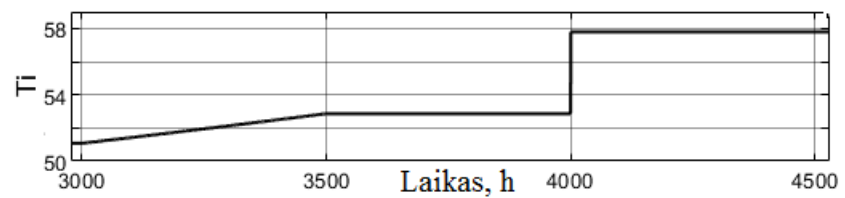
b)



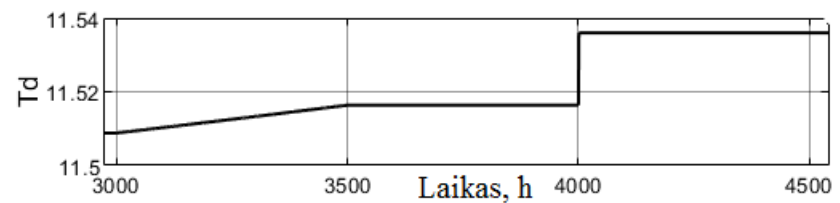
c)



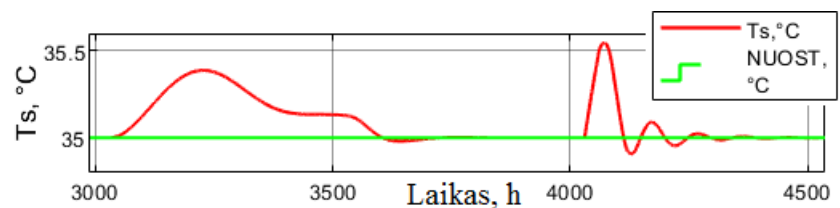
d)



e)



f)



g)

**4.2 pav.** Metantanko adaptyvaus valdymo sistemos veikimo tyrimas kompensuojant trikdančius poveikius: a) įtekančio dumblo tūrinio srauto (nuo 40 m<sup>3</sup>/h iki 30 m<sup>3</sup>/h) ir temperatūros (nuo 10 °C iki 18 °C) signalas, trikdžio kompensavimui tirti; b), c) atitinkamai metantanko proceso stiprinimo koeficiento ir laiko pastoviosios laiko trajektorijos; d), e), f) atitinkamai *PID* reguliatoriaus stiprinimo koeficiento, integralinės dedamosios ir diferencialinės dedamųjų adaptacijos laiko trajektorijos; g) valdomos metantanko temperatūros laiko trajektorija

Trikdančio poveikio metu adaptacijos valdymo sistema perskaičiuoja proceso bei reguliatoriaus parametrus. Modelyje (žr. 4.1 pav.) naudojamos polinominės lygtys  $K = f(F_{in}, T_{in})$  ir  $T = f(F_{in}, T_{in})$ , kurios apskaičiuoja proceso stiprinimo koeficientus  $K_{pr}$  ir laiko pastoviasias  $T_{pr}$ . Šie parametrai pateikti 4.2 pav. b), c).

Apskaičiuojamas pastovus proceso stiprinimo koeficientas, kai įtekančio dumblo temperatūra ir tūrinis srautas nekinta. Temperatūra pradeda didėti nuo 10 °C (3000 h), tuo pat metu pradeda mažėti stiprinimo koeficientas nuo 0,3301. Temperatūra pasiekia 18 °C (3500 h), o stiprinimo koeficientas 0,2317. Įtekančio dumblo srauto greitis pasikeičia nuo 40 m<sup>3</sup>/h iki 30 m<sup>3</sup>/h (4000 h), o stiprinimo koeficientas padidėja nuo 0,2317 iki 0,3097.

Proceso laiko pastovioji visada didėja, nes yra didinama įtekančio dumblo temperatūra ir mažinamas srauto greitis. Laiko pastovioji kinta intervale nuo 118,6 h iki 190,1 h.

Diskretinio reguliatoriaus parametrai adaptyvioje valdymo sistemoje apskaičiuojami *MATLAB FUNCTION ITAE* bloke. Gautos adaptyvaus reguliatoriaus parametrų kitimo laiko trajektorijos pavaizduotos 4.2 pav. d), e), f).

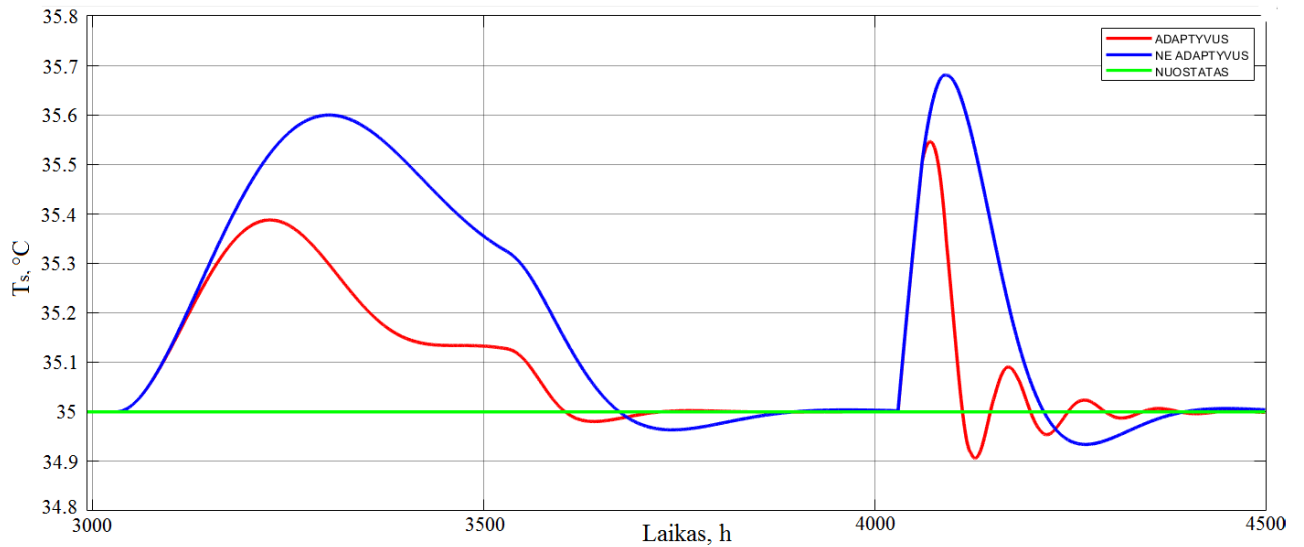
Adaptyvaus reguliatoriaus stiprinimo koeficientas  $K_r$  kinta intervale nuo 15,11 iki 25,18. Integralinė reguliatoriaus dedamoji kinta intervale nuo 51,07 iki 57,8. Diferencialinės dedamosios kitimo intervalas nuo 11,509 iki 11,536 praktiškai nereikšmingas.

Metantanko dumblo temperatūros reakcijos kokybės parametrai yra tinkami mikroorganizmų gyvavimui ir dauginimuisi (neviršija 1 °C). Įtekančio dumblo temperatūros trikdys sukelia 0,39 °C (3226 h) nuokrypą, o nusistovėjimo laikas – 557 h. Įtekančio dumblo tūrinio srauto greičio kitimas sukelia 0,55 °C (4071 h) nuokrypą, o nusistovėjimo laikas – 106 h.

Atliekamas tyrimas, sulyginant metantanko dumblo temperatūros reakcijų kokybės rodiklius, gautus nenaudojant ir naudojant adaptacijos valdymo metodą. Visiems modeliavimo eksperimentams gautos metantanko dumblo temperatūros reakcijos naudojant vienodą įtekančio dumblo signalą, kuris pavaizduotas 4.2 pav. a). Naudojant adaptacijos algoritmą šiuose modeliavimo eksperimentuose metantanko dumblo temperatūros reakcijos yra vienodos. Skiriasi tik metantanko dumblo temperatūros reakcijos, kurioms gauti yra naudojamas pastoviai suderintas *PID* reguliatorius pagal skirtingus išorinius poveikius (žr. 3.4 pav.). Gauti grafikai pavaizduoti 4.3–4.11 pav.

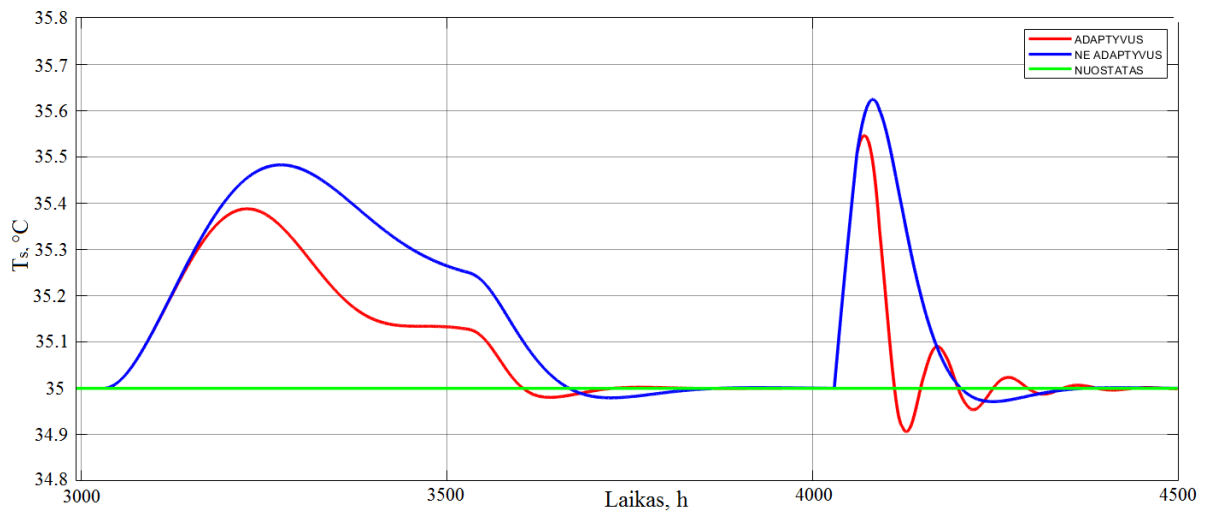
Adaptyvi valdymo sistema lyginama su pirmo eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  12.4211,  $T_i$  68.7108,  $T_d$  11.5742) (žr. 4.3 pav.).





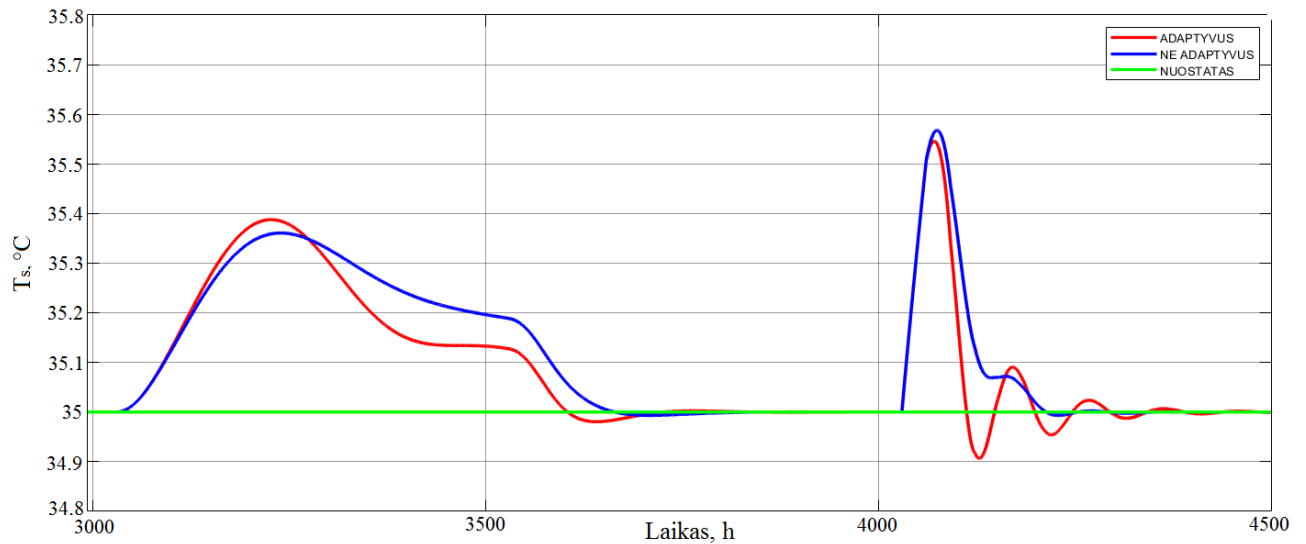
**4.3 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems pirmojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 1)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su antro eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  15,8230,  $T_i$  69,8880,  $T_d$  11,5779).



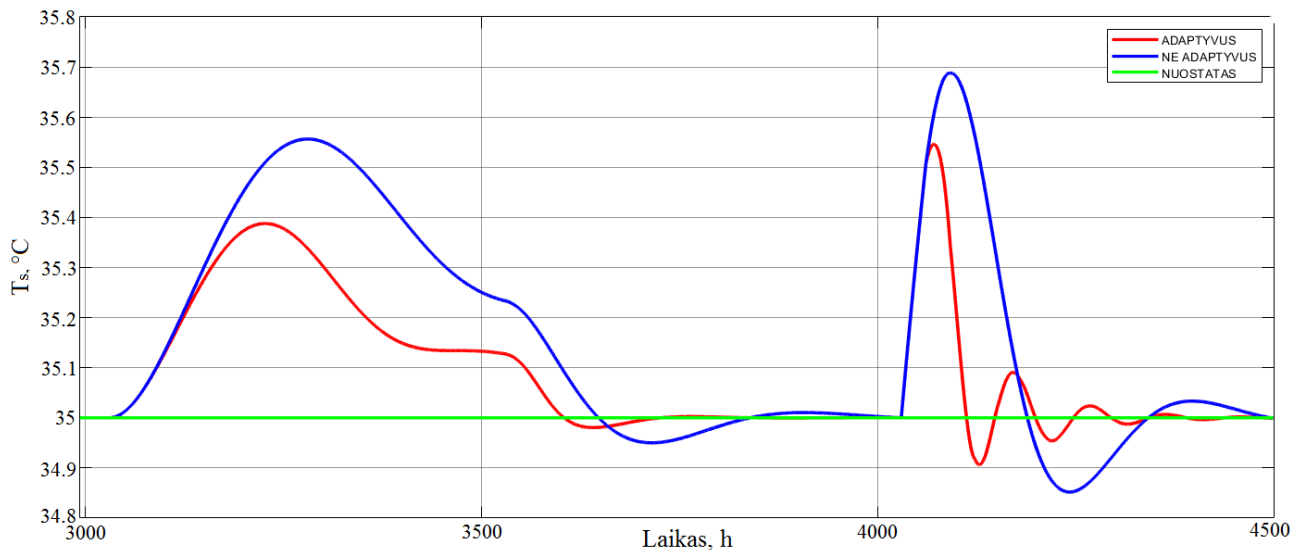
**4.4 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems antrojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 2)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su trečio eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  21,5576,  $T_i$  71,1231,  $T_d$  11,5818).



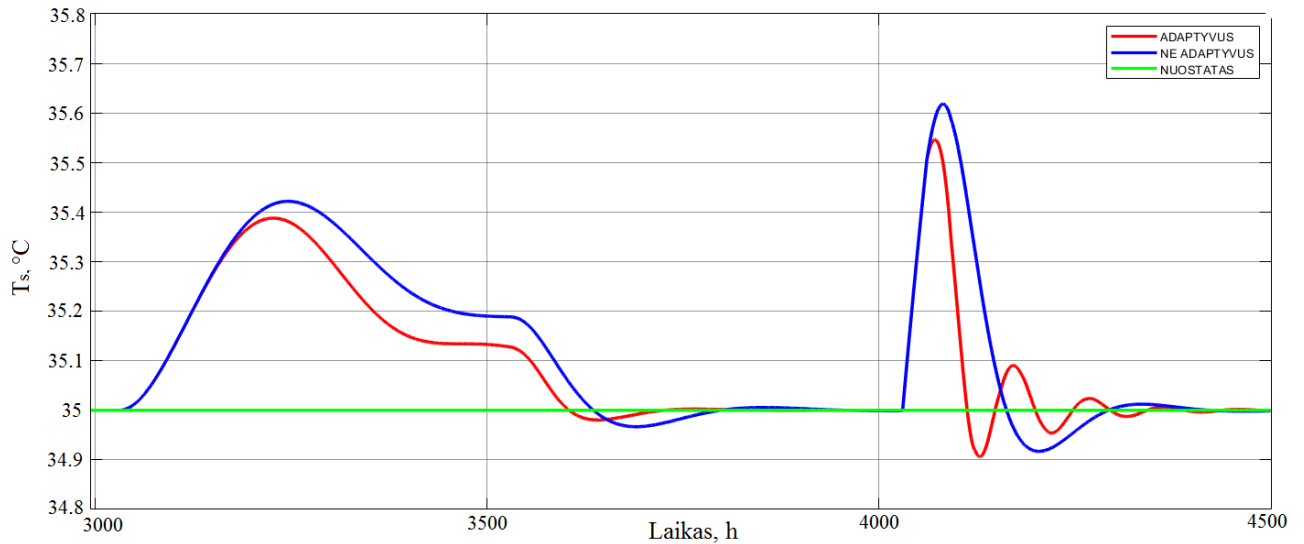
**4.5 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems trečiojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 3)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su ketvirto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  11,6941,  $T_i$  54,7731,  $T_d$  11,5242).



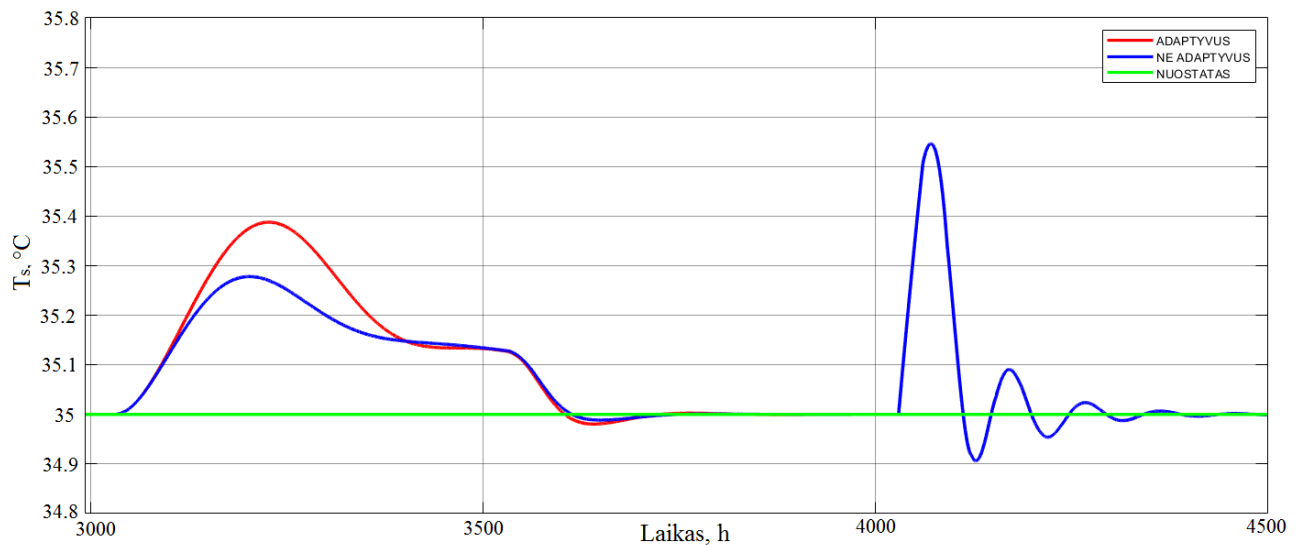
**4.6 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems ketvirtojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 4)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su penkto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  16,0800,  $T_i$  56,2343,  $T_d$  11,5300).



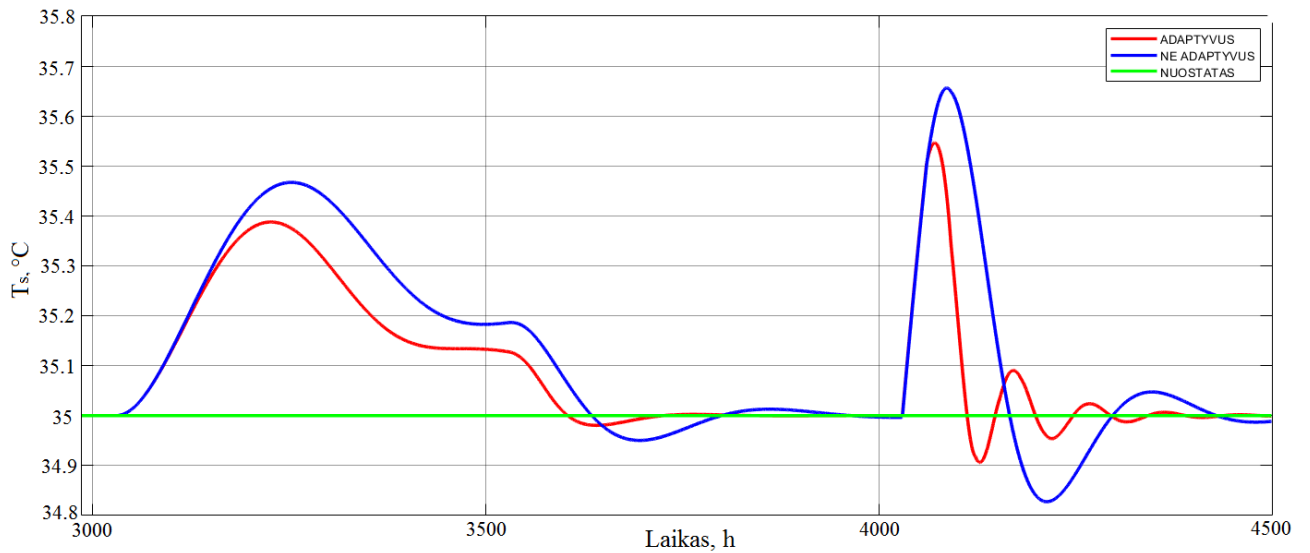
**4.7 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems penktojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 5)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su šešto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  25,1769,  $T_i$  57,7959,  $T_d$  11,5360).



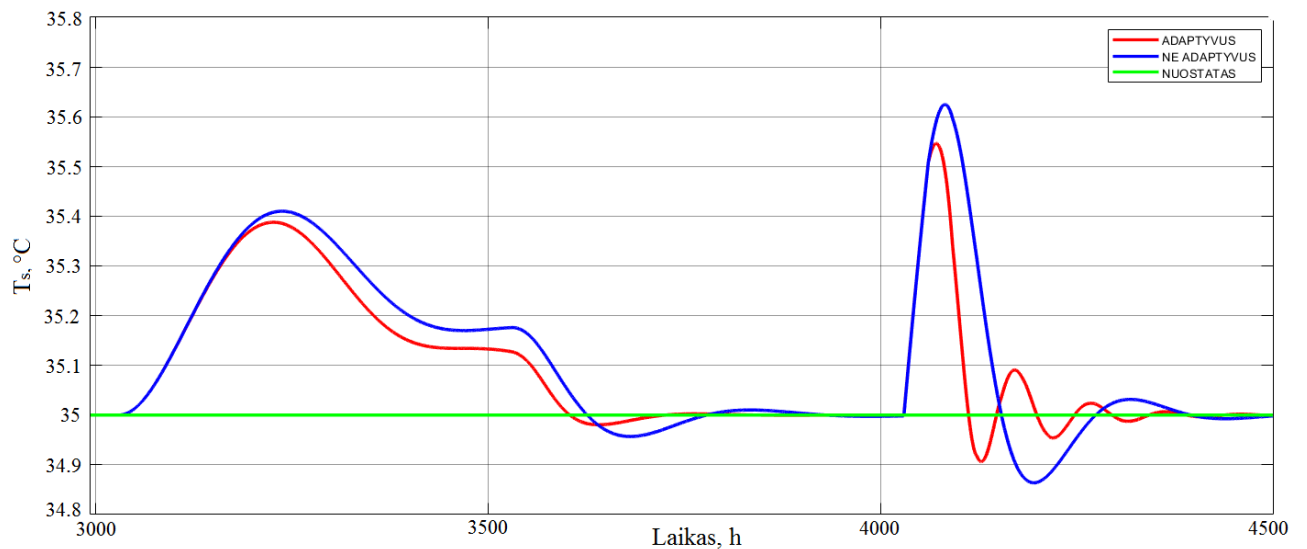
**4.8 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems šeštojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 6)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su septinto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  13,2485,  $T_i$  49,0438,  $T_d$  11,4999).



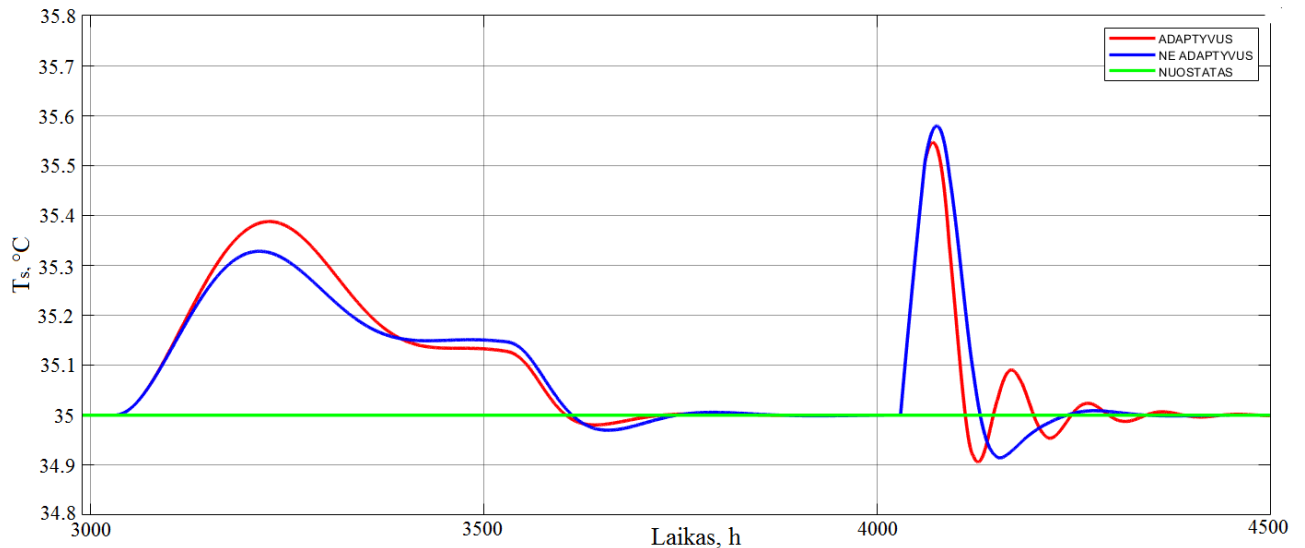
**4.9 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems septintojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 7)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su aštunto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  15,4798,  $T_i$  50,0393,  $T_d$  11,5043).



**4.10 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems aštuntojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 8)

Adaptyvi valdymo sistema lyginama su devinto eksperimento išoriniais poveikiais suderintu diskretiniu reguliatoriumi ( $K_r$  19,9221,  $T_i$  51,2631,  $T_d$  11,5096).



**4.11 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos ir įprastos valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi veikimo palyginimas kompensuojant trikdančius poveikius. Įprastos sistemos reguliatorius suderintas įtekančio dumblo tūriniam srautui ir temperatūrai, atitinkantiems devintojo eksperimento sąlygas (3.4 lentelė, Nr. 9)

Gauti metantanko dumblo temperatūros trikdžio kompensavimo reakcijų kokybės rezultatai rodo gerą adaptacijos valdymo algoritmo veikimą ir skirtumą tarp adaptyvios valdymo sistemos ir neadaptyvios (*PID* reguliatorius suderintas pagal vieno eksperimento išorinius poveikius). Adaptyvios ir neadaptyvios valdymo sistemos metantanko temperatūros reakcijos kokybės parametrai pateikti 4.1 lentelėje.

**4.1 lentelė.** Metantanko dumblo temperatūros valdymo sistemų trikdžio kompensavimo kokybės rodikliai, naudojant neadaptivų ir adaptivų reguliatorius

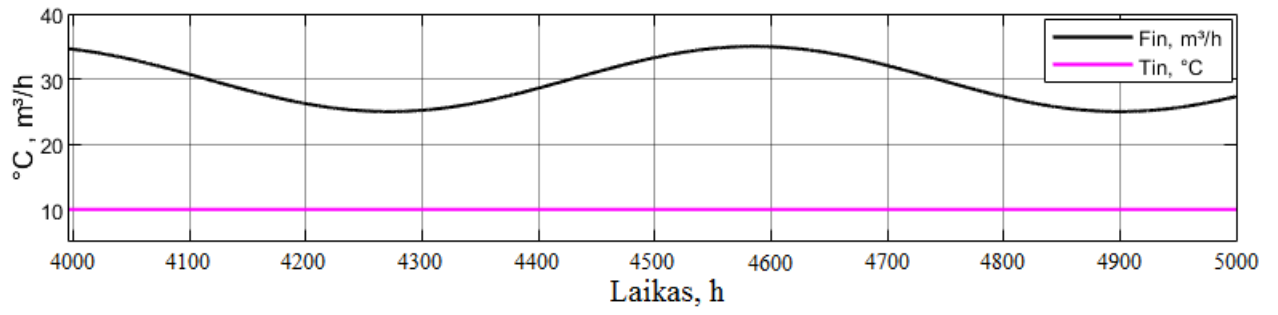
<b>Valdymo sistema su pastoviais PID reguliatoriaus derinimo parametrais</b>				
Modeliavimo eksperimentas	Maksimalus perreguliavimas		Pereinamojo proceso trukmė	
	Temperatūra (trikdis), °C	Srautas (trikdis), °C	Temperatūra (trikdis), h	Srautas (trikdis), h
1	0,6	0,68	638	191
2	0,48	0,62	631	168
3	0,36	0,57	605	128
4	0,56	0,69	620	289
5	0,42	0,62	604	147
6	0,28	0,55	434	106
7	0,47	0,66	608	257
8	0,41	0,62	601	226
9	0,33	0,58	588	122
Vidutinė absoliutinė nuokrypa	0,43	0,62	593	182
Vidutinė santykinė nuokrypa	1,24 %	1,77%		
<b>Adaptivi valdymo sistema</b>				
	0,39	0,55	557	106
Santykinė nuokrypa	1,11 %	1,57 %		

Adaptivios valdymo sistemos ir valdymo sistemos su pastoviais *PID* reguliatoriaus parametrais, suderintais įvairioms valdomo proceso būsenoms, modeliavimo rezultatai parodė reikšmingą adaptivios valdymo sistemos pranašumą.

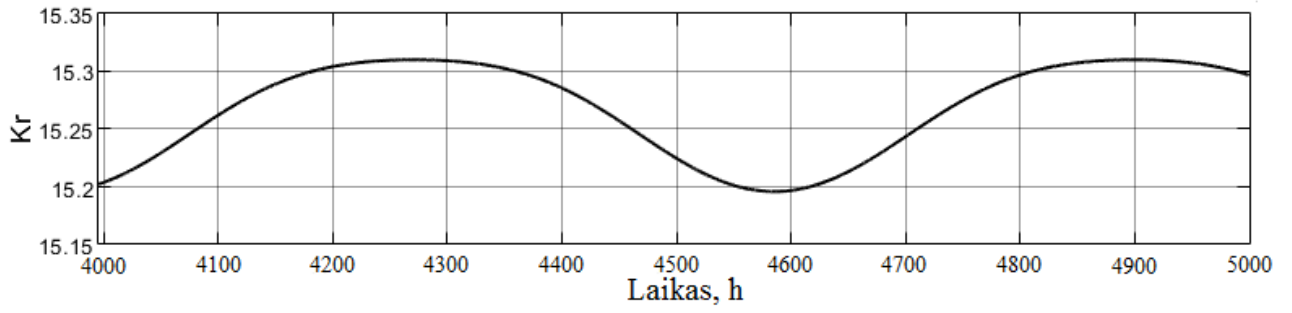
Naudojant modeliavimo eksperimente reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais maksimalaus perreguliavimo vidutinė absoliutinė nuokrypa kompensuojant temperatūros trikdantį poveikį yra 0,43 °C, kompensuojant dumblo srauto trikdantį poveikį – 0,62 °C. Naudojant adaptivią valdymo sistemą maksimalus perreguliavimas kompensuojant temperatūros trikdantį poveikį vidutiniškai sumažėja 9 %, kompensuojant srauto pokytį vidutiniškai sumažėja 11 %.

Naudojant reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais temperatūros trikdžio kompensavimo vidutinė absoliutinė pereinamojo proceso trukmė yra 593 h, kompensuojant srauto trikdantį poveikį – 182 h. Naudojant adaptivią valdymo sistemą pereinamojo proceso trukmė kompensuojant temperatūros trikdantį poveikį sumažėja 6 %, kompensuojant srauto trikdantį poveikį – 42 %.

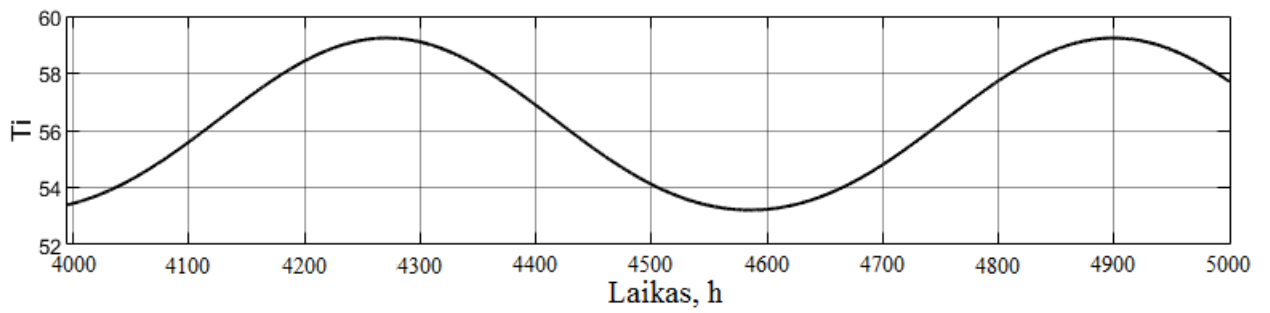
Atliekamas kitas trikdžio kompensavimo eksperimentas. Naudojamas modelis pateiktas 6 priede. Įtekančio dumblo temperatūra yra pastovi (10 °C), o tūrinis srautas kinta sinusoide, kurios amplitudė – 5 m<sup>3</sup>/h, pavaizduota 4.12 pav. a). Modeliuojama svyravimų amplitudė (5 m<sup>3</sup>/h) parinkta remiantis stebimu dumblo tūrinio srauto kitimu. Išorinių poveikių signalas, adaptivaus diskretinio reguliatoriaus parametrai ir metantanko dumblo temperatūros reakcija pavaizduoti 4.12 pav. Metantanko proceso dinaminių parametrų kitimo laiko trajektorijos pavaizduotos 6 priede.



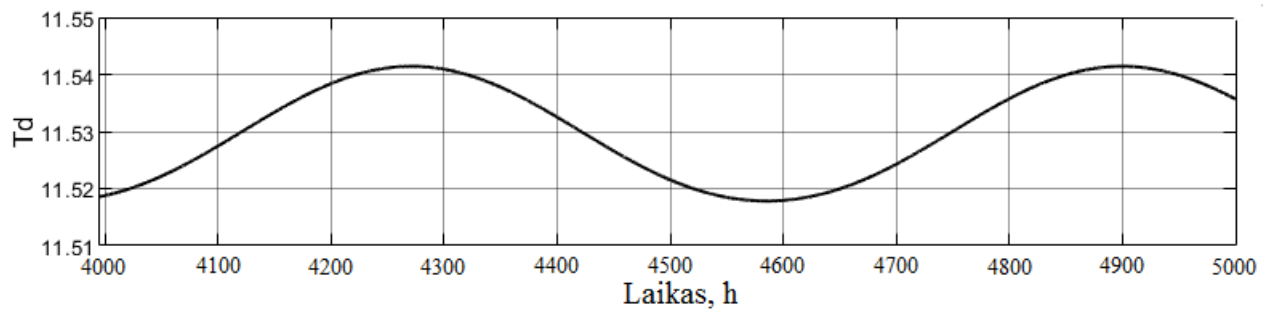
a)



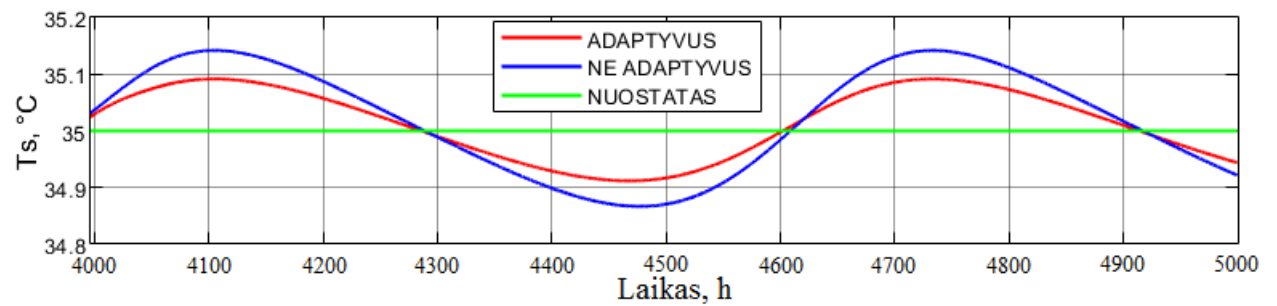
b)



c)



d)



e)

**4.12 pav.** Adaptyviosios valdymo sistemos veikimo modeliavimas kompensuojant periodiškai kintančio įtekančio dumblo tūrinio srauto trikdantį poveikį: a) įtekančio dumblo tūrinio srauto ir temperatūros laiko trajektorijos; b), c), d) atitinkamai *PID* reguliatoriaus stiprinimo koeficiento, integralinės dedamosios ir diferencialinės dedamųjų adaptacijos laiko trajektorijos; e) valdomos metantanko temperatūros laiko trajektorija. Temperatūros valdymo kokybės palyginimui e) grafike pateikti modeliavimo rezultatai, valdymui naudojant sistemą su pastoviai suderintu reguliatoriumi.

Neadaptyvios valdymo sistemos *PID* reguliatorius suderintas naudojant pirmo eksperimento išorinius poveikius.

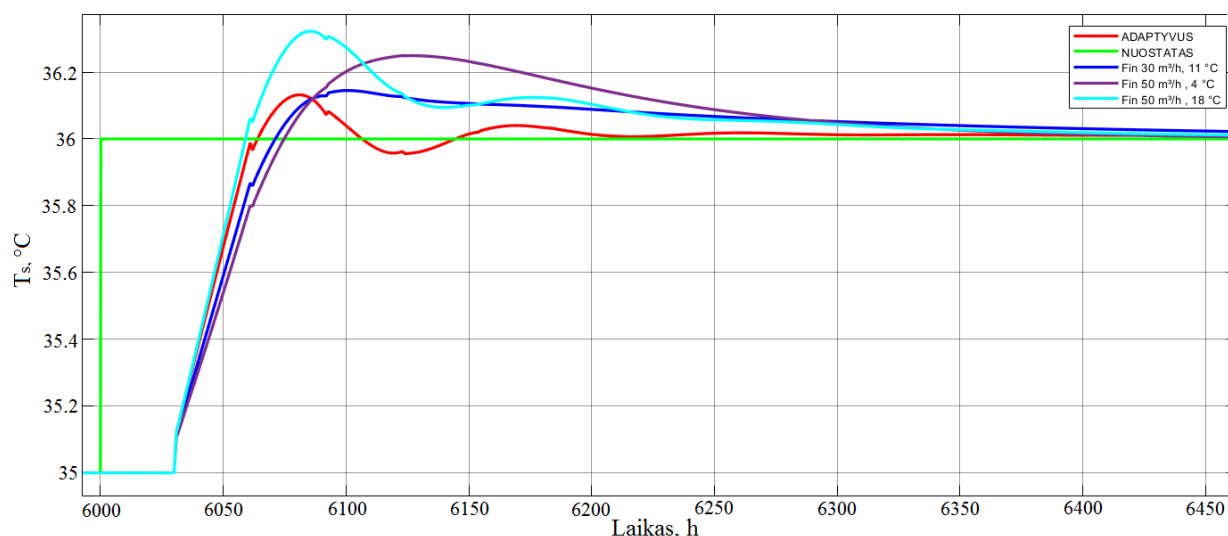
Iš rezultatų nustatyta, kad adaptyvios valdymo sistemos svyravimų amplitudė mažesnė 36 % lyginant su pirmo eksperimento išoriniais poveikiais suderintu *PID* reguliatoriumi.

## 4.2 Adaptacijos valdymo algoritmo temperatūros nuostato sekimo tyrimas

Nuostato sekimui naudojamas modelis, kuris pavaizduotas 7 priede. Tyrimui atlikti užduodamas pastovus įtekančio dumblo srautas 10 m<sup>3</sup>/h ir temperatūra 18 °C. Nuostatas keičiamas nuo 35 °C iki 36 °C. Atliekami eksperimentai lyginant neadaptivią ir adaptyvią valdymo sistemas. Neadaptyvioje valdymo sistemoje *PID* reguliatoriaus parametrai yra pastovūs ir apskaičiuoti naudojant skirtingus eksperimento išorinius poveikius. *MATLAB FUNCTION ITAE* bloke yra įvedamos *ITAE* metodo nuostato formulės [5]:

```
function [Kr,Ti,Td] = fcn(Kpr,Tpr)
%#codegen
%ITAE PID metodas nuostatui sekti
vel=30;
Kr=(0.965/Kpr)*((Tpr/vel)^0.855)
Ti=Tpr/(0.796-0.147*(vel/Tpr))
Td=0.308*Tpr*(vel/Tpr)^0.929
```

Gautos metantanko dumblo temperatūros reakcijos pavaizduotos 4.13 pav.



**4.13 pav.** Metantanko dumblo temperatūros nuostato sekimo reakcijos, kurios gautos lyginant neadaptivią ir adaptyvią valdymo sistemas



Iš apskaičiuotų kokybės rezultatų galima nustatyti gerą adaptacijos valdymo algoritmo veikimą ir nuostato sekimo skirtumą tarp adaptyvios ir neadaptyvios valdymo sistemų. Šių valdymo sistemų metantanko dumblo temperatūros reakcijų kokybės parametrai nurodyti 4.2 lentelėje.

**4.2 lentelė.** Metantanko dumblo temperatūros valdymo sistemų nuostato sekimo kokybės rodikliai, naudojant neadaptyvų ir adaptyvų reguliatorius

<b>Valdymo sistema su pastoviais PID reguliatoriaus derinimo parametrais</b>		
Modeliavimo eksperimentas	Maksimalus perreguliavimas, °C	Pereinamojo proceso trukmė, h
5 ( <i>Fin</i> 30 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 11 °C)	0,14	153
7 ( <i>Fin</i> 50 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 4 °C)	0,25	241
9 ( <i>Fin</i> 50 m <sup>3</sup> /h, <i>Tin</i> 18 °C)	0,32	131
Vidutinė absoliutinė nuokrypa	0,24	175
Vidutinė santykinė nuokrypa	0,67 %	
<b>Adaptyvi valdymo sistema</b>		
	0,13	88
Santykinė nuokrypa	0,36 %	

Adaptyvios ir neadaptyvios valdymo sistemos nuostato sekimo modeliavimo rezultatai parodė reikšmingą adaptyvios valdymo sistemos pranašumą.

Naudojant modeliavimo eksperimente reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais nuostato sekimo maksimalaus perreguliavimo vidutinė absoliutinė nuokrypa yra 0,24 °C. Lyginant su adaptyvia valdymo sistema nuostato sekimo maksimalus perreguliavimas sumažėja 46 %.

Naudojant reguliatorių su pastoviais derinimo parametrais nuostato sekimo vidutinė absoliutinė pereinamojo proceso trukmė – 175 h. Lyginant su adaptyvia valdymo sistema nuostato sekimo pereinamojo proceso trukmė sumažėja 50 %.

## Išvados

1. Išnagrinėtas metantanko technologinis procesas. Surinkti proceso modeliavimui reikalingi technologiniai parametrai.
2. Apžvelgti adaptyvaus valdymo metodai ir jų taikymas. Pasiūlyta metantanko temperatūros adaptyvaus valdymo sistemos struktūra, paremta stiprinimo numatymo (angl. *gain scheduling*) adaptacijos metodikos taikymu, išplečiant ją 2 trikdantiems poveikiams. Nustatyti pagrindiniai išoriniai poveikiai (įtekančio dumblo srautas ir temperatūra), kurie įtakoja metantanko proceso dinamiką. Nustatytos valdomo proceso dinaminių parametru funkcinės priklausomybės nuo pagrindinių išorinių poveikių. Identifikuotos priklausomybės rodo gerą eksperimentinių ir prognozuojamų rezultatų sutapimą (stiprinimo koeficiento vidutinė santykinė nuokrypa 5.33 %, laiko pastoviosios 0.67 %).
3. Atliktas *PI* ir *PID* reguliatorių *ITAE* ir *IMC* derinimo taisyklių tinkamumo tyrimas, derinant reguliatorius metantanko temperatūros nuostato sekimui ir trikdančių poveikių kompensavimui. Nustatyta, kad *PID ITAE* trikdžio kompensavimo ir nuostato sekimo derinimo formulės yra labiau tinkamos metantanko temperatūros reguliavimui lyginant su *IMC PI*, *IMC PID*, *ITAE PI* formulėmis. Remiantis tyrimo rezultatais adaptyvios valdymo sistemos realizavimui parinktas *PID* reguliatorius, derinamas pagal *ITAE* taisyklės. Nustatytas diskretinio regulatoriaus žingsnis 1 h rodo gerą sutapimą tarp tolydinio regulatoriaus ir diskretinio regulatoriaus veikimo kokybės rodiklių.
4. Adaptyvios valdymo sistemos veikimas palygintas su pastoviai suderinto *PID* regulatoriaus veikimu. Modeliavimo rezultatai, gauti valdant procesą plačiame dinaminių parametru kitimo diapazone, parodė reikšmingą adaptyvios valdymo sistemos pranašumą:
  - naudojant adaptyvią valdymo sistemą maksimalus perreguliavimas kompensuojant temperatūros trikdantį poveikį vidutiniškai sumažėja 9 %, kompensuojant srauto pokytį vidutiniškai sumažėja 11 %. Naudojant adaptyvią valdymo sistemą pereinamojo proceso trukmė kompensuojant temperatūros trikdantį poveikį sumažėja 6 %, kompensuojant srauto trikdantį poveikį 42 %.
  - adaptyvios valdymo sistemos nuostato sekimo pereinamojo proceso trukmė sumažėja 50 %, o maksimalus perreguliavimas 46 %.
5. Metantanko temperatūros adaptyvi valdymo sistema remiasi įprastais metantanko proceso technologinių parametru matavimais ir gali būti nesunkiai realizuojama siekiant pagerinti metantankų valdymo kokybę.

## Literatūros sąrašas

1. SEBORG, Dale E, EDGAR, Thomas F. *Process dynamics and control* (2nd ed.) [interaktyvus]. 2004 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/264652868\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Control\\_2nd\\_Edition\\_By\\_Dale\\_E\\_Seborg\\_Thomas\\_F\\_Edgar\\_and\\_Duncan\\_A\\_Mellichamp](https://www.researchgate.net/publication/264652868_Process_Dynamics_and_Control_2nd_Edition_By_Dale_E_Seborg_Thomas_F_Edgar_and_Duncan_A_Mellichamp)
2. BRAZAUSKAS, K. and LEVISAUSKAS, D. Adaptive transfer function-based control of nonlinear process. Case study: Control of temperature in industrial methane tank. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* [interaktyvus]. 2007, 21(10), 871-884 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.ktu.edu/doi/abs/10.1002/acs.954>
3. HÄGGLUND, T. and ÅSTRÖM, K.J. *Supervision of adaptive control algorithms*. [interaktyvus]. 2000, 36(8), pp.1171–1180. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0005109800000261?via%3Dihub>
4. LEVIŠAUSKAS, Donatas ir Tomas TEKORIUS. *Eksperimentinių tyrimų planavimas: mokomoji knyga*. Kauno Technologijos Universitetas, Kaunas, 2007 m. 89 p. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: [https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=KTU01000092456&context=L&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,7.%09Eksperimentini](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=KTU01000092456&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,7.%09Eksperimentini)
5. LEVIŠAUSKAS, Donatas. *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas: mokomoji knyga*. Kauno Technologijos Universitetas, Vilnius, 2008 m. 117 p. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: [https://www.ebooks.ktu.lt/eb/420/automatinio\\_reguliavimo\\_sistemu\\_derinimas/](https://www.ebooks.ktu.lt/eb/420/automatinio_reguliavimo_sistemu_derinimas/)
6. SATO, M. Gain-Scheduled Model-Matching Flight Controller Using Inexact Scheduling Parameters Supported by JSPS KAKENHI Grant 15K06159. *IFAC PapersOnLine* [interaktyvus]. 2016, t. 49(17), pp.88–93. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S2405896316314884?via%3Dihub>
7. GNOTH, STEFAN et al. Simple adaptive pH control in bioreactors using gain-scheduling methods. *Applied Microbiology and Biotechnology* [interaktyvus]. 2010, t. 85(4), pp.955–964. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19680646>
8. VANDOREN, V.J. *Techniques for Adaptive Control*. 1st ed. [interaktyvus]. 2002, [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://web-b-ebshost-com.ezproxy.ktu.edu/ehost/detail/detail?vid=0&sid=bac7594e-77fe-4838-8992-27ac87036853%40pdc-v-sessmgr06&bdata=JnNpdGU9ZWZWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#AN=210298&db=e000xww>
9. LUO, T. et al. A novel model-based adaptive control strategy for step-feed SBRs dealing with influent fluctuation. *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2014, 167, pp.476–483. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0960852414008359?via%3Dihub>

- %C5%B3%20tyrim%C5%B3%20planavimas:%20Mokomoji%20knyga&offset=0
10. CHITSANGA, N. and KAITWANIDVILAI, S. Robust 2DOF fuzzy gain scheduling control for DC servo speed controller. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* [interaktyvus]. 2016, t. 11(6), pp.730–738. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.ktu.edu/doi/full/10.1002/tee.22298>
  11. LING, C. and EDGAR, T.F. A New Fuzzy Gain Scheduling Algorithm for Process Control. *1992 American Control Conference* [interaktyvus]. 1992, pp.2284–2290. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/search/searchresult.jsp?searchWithin=%22Publication%20Number%22:4791998&searchWithin=%22Document%20Title%22:A%20New%20Fuzzy%20Gain%20Scheduling%20Algorithm%20for%20Process%20Control>
  12. SONG, YOUNG-CHAE et al. Modeling methane production in anaerobic forward osmosis bioreactor using a modified anaerobic digestion model No. 1. *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2018, t. 264, pp.211–218. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0960852418306497?via%3Dihub>
  13. APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* [interaktyvus]. 2008, 34(6), pp.755–781. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0360128508000312?via%3Dihub>
  14. TUROVSKIY, IZRAIL S ir MATHAI, P.K. Wastewater sludge processing [interaktyvus]. 2006, [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www.bookdepository.com/Wastewater-Sludge-Processing-Izrail-S-Turovskiy/9780471700548>
  15. HWANG, M.H. et al. Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: the role of pH. *Journal of Biotechnology* [interaktyvus]. 2004, t. 111(3), pp.297–309. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0168165604002214?via%3Dihub>
  16. CHEN, H., YI, H., LI, H., GUO, X., and XIAO, B. (2020). *Effects of thermal and thermal-alkaline pretreatments on continuous anaerobic sludge digestion: performance, energy balance and, enhancement mechanism* [interaktyvus]. 2020, 147, 2409-2416. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0960148119315423?via%3Dihub>
  17. PLUKAS, Kostas, BARAUSKAS, Rimantas ir GAIDYS, Rimvydas. *Skaitiniai inžinerijos metodai MATLAB'o terpėje: vadovėlis*. Kaunas: Technologija, 2012. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/329/skaitiniai-inzinerijos-metodai-matlab%E2%80%98o-terpeje/>
  18. ZHAO, JIANWEI et al. Aged refuse enhances anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Research* [interaktyvus]. 2017, t. 123, pp.724–733. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:

- <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0043135417305997?via%3Dihub>
19. ZHEN, G. et al. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2017, t. 69, pp.559–577 [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S1364032116309352?via%3Dihub>
  20. METCALF, LEONARD and EDDY, HARRISON P. *Wastewater engineering: treatment and reuse* 4th ed., Boston [Mass.]: McGraw-Hill [interaktyvus]. 2007, [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
[https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=KTU01000091552&context=L&vid=KTU&lang=lt\\_LT&search\\_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,19.%09Metcalf,%20Leonard%20&%20Eddy,%20Harrison%20P.,%202007.%20Wastewater%20engineering:%20treatment%20and%20reuse&offset=0](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=KTU01000091552&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=any,contains,19.%09Metcalf,%20Leonard%20&%20Eddy,%20Harrison%20P.,%202007.%20Wastewater%20engineering:%20treatment%20and%20reuse&offset=0)
  21. QASIM SR. *Wastewater Treatment Plants: Planning. Design and operation*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press [interaktyvus]. 1999, [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
<https://www.routledge.com/Wastewater-Treatment-Plants-Planning-Design-and-Operation-Second-Edition/Qasim/p/book/9781566766883>
  22. LI, XIAOWEI. *Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China*. *Water Research* [interaktyvus]. 2018, 142, 75-86. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0043135418304068?via%3Dihub>
  23. RAHEEM, A. et al. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2018, t. 337, pp.616–641. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S1385894717322714>
  24. Aplinkos apsaugos agentūra. Ataskaita. Visuomenės informavimas apie nuotekų ir dumblo tvarkymą pagal 1991 m. gegužės 21 d. Tarybos direktyvos Nr. 91/271/EEB dėl miesto nuotekų valymo 16 straipsnį. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:  
[http://vanduo.gamta.lt/files/Visuomen%C4%97s%20informavimo%20ataskaita\\_2019.pdf](http://vanduo.gamta.lt/files/Visuomen%C4%97s%20informavimo%20ataskaita_2019.pdf)

## Priedai

### 1 priedas. Laiko pastoviosios paviršiaus sudarymas izolinijomis *MATLAB* pakete

```
clc;
clear all;
[Fin,Tin] = meshgrid (10:.1:50, 4:.1:18);
T=519.0077-18.4037.*Fin+3.7292.*Tin-
0.0591.*Fin.*Tin+0.1997.*Fin.^2+0.0255.*Tin.^2;

%braizoma tinkline diagrama
figure(1);
mesh(Fin,Tin,T);
xlabel('Fin, m³/h'); ylabel('Tin, °C'); zlabel('T, h');

%braizoma konturinis zemelapis
figure(2);
V=10:20:600; %izoliniju zymes
[cs,h]=contour (Fin,Tin,T,V); clabel(cs,h);
xlabel('Fin, m³/h'); ylabel('Tin, °C')
```

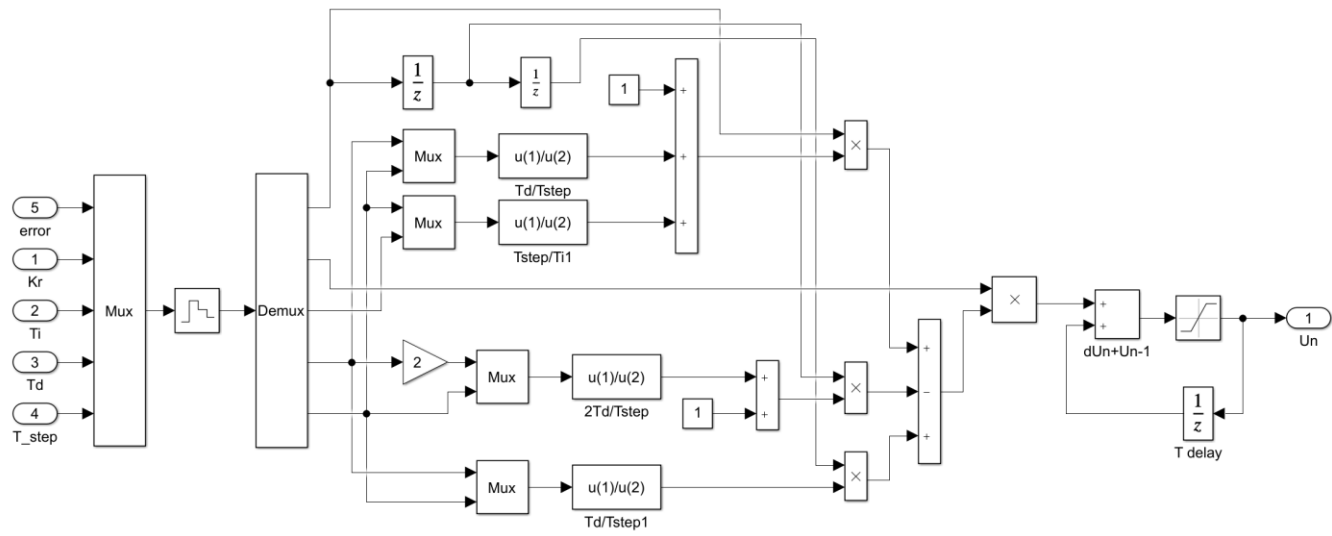
## 2 priedas. Stiprinimo koeficiento paviršiaus sudarymas izolinijomis *MATLAB* pakete

```
clc;
clear all;
[Fin,Tin] = meshgrid (10:.01:50, 4:.01:18);
K=1.7611-0.0536.*Fin-0.0307.*Tin+0.0006.*Fin.*Tin+0.0005.*Fin.^2-0.0002.*Tin.^2

%braizoma tinkline diagrama
figure(1);
mesh(Fin,Tin,K);
xlabel('Fin, m³/h'); ylabel('Tin, °C'); zlabel('K');

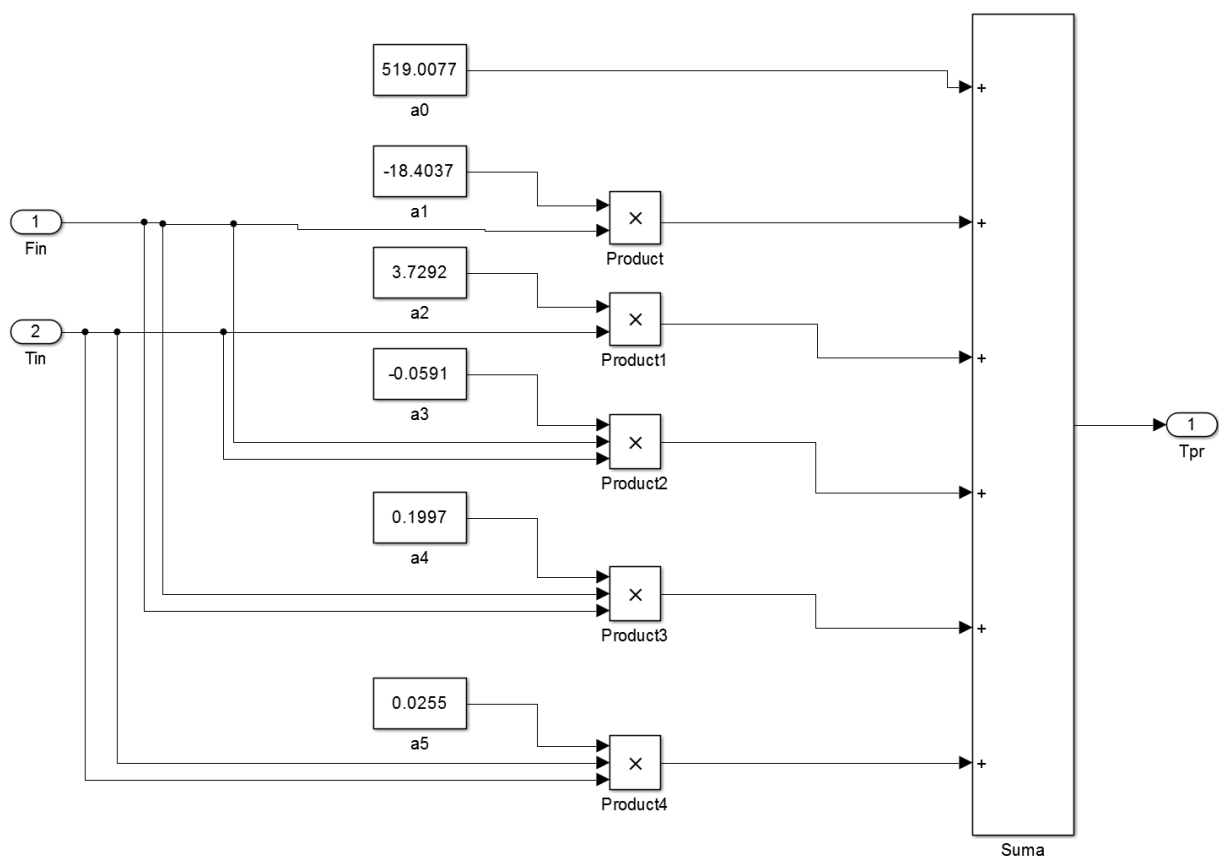
%braizoma konturinis zemelapis
figure(2);
V=0:0.1:6; %izoliniju zymes
[cs,h]=contour(Fin,Tin,K,V); clabel(cs,h);
xlabel('Fin, m³/h'); ylabel('Tin, °C')
```

### 3 priedas. Diskretinio regulatoriaus modelis

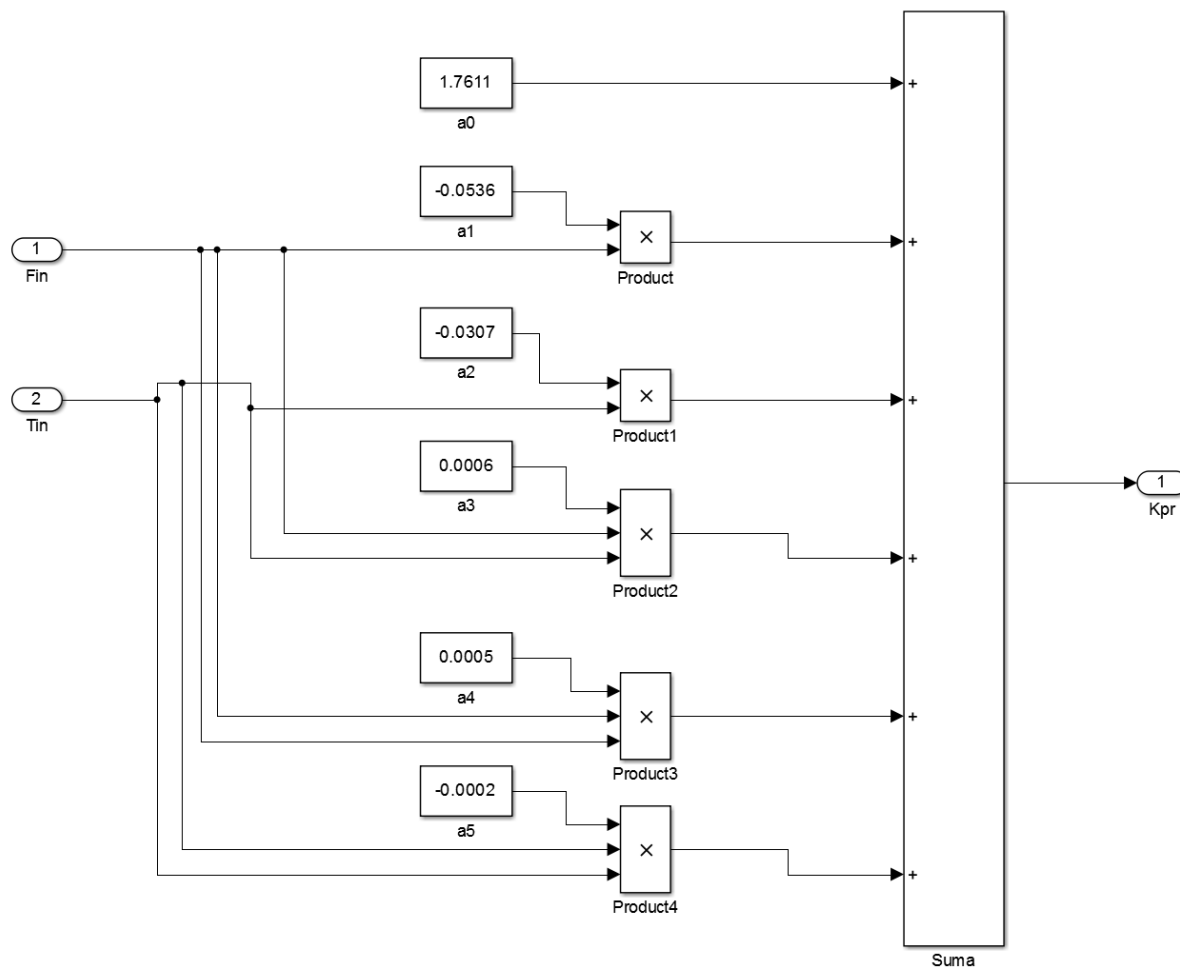




#### 4 priedas. Polinominės lygties $T = f(F_{in}, T_{in})$ modelis

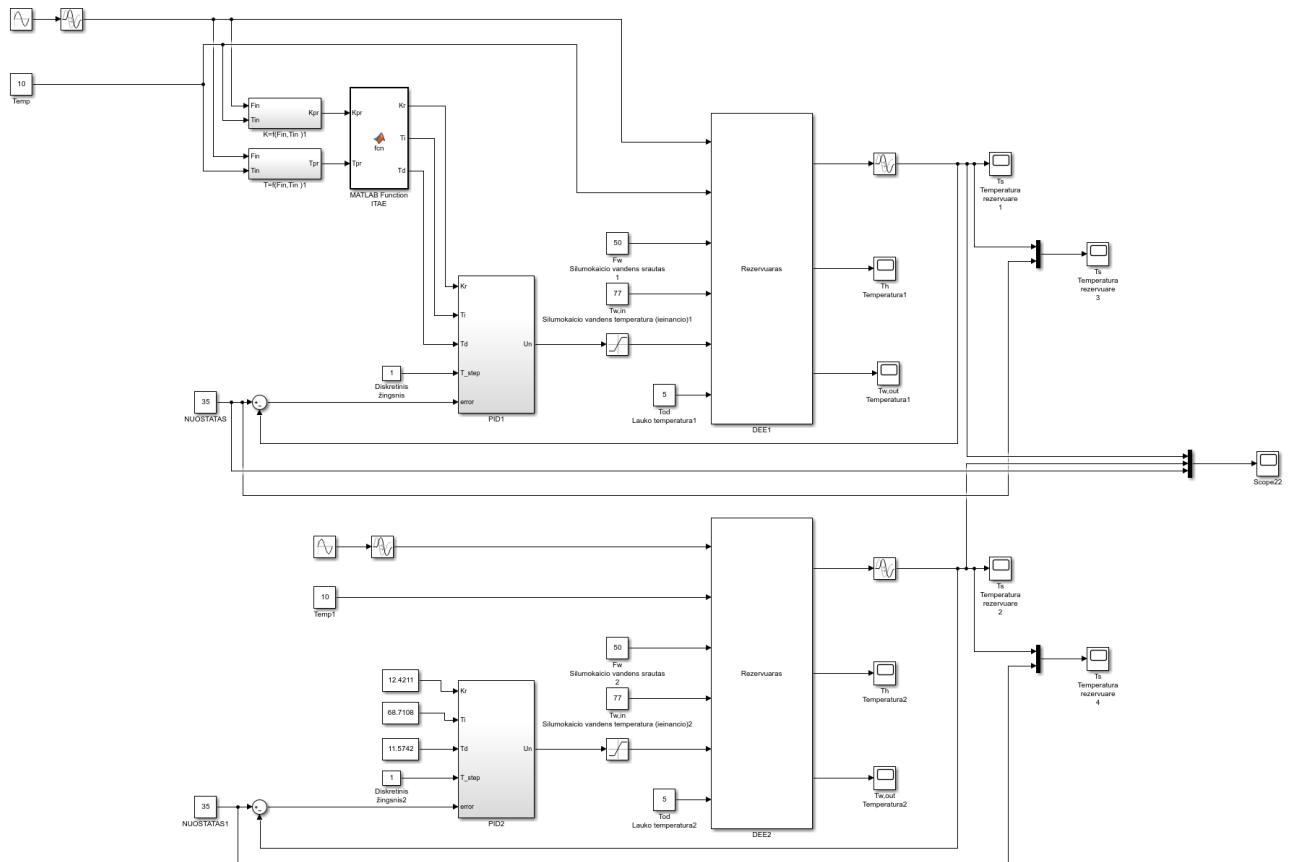


### 5 priedas. Polinominēs lygties $K = f(F_{in}, T_{in})$ modelis



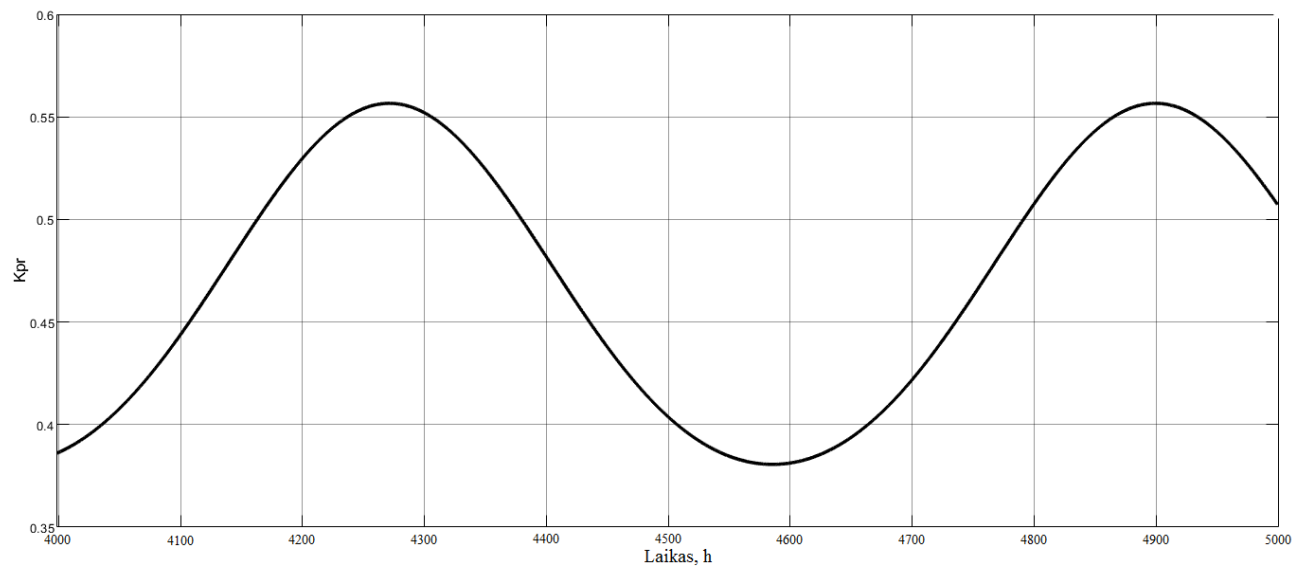
## 6 priedas. Sinusinio signalo trikdžio kompensavimui naudojamas modelis

### Modelis

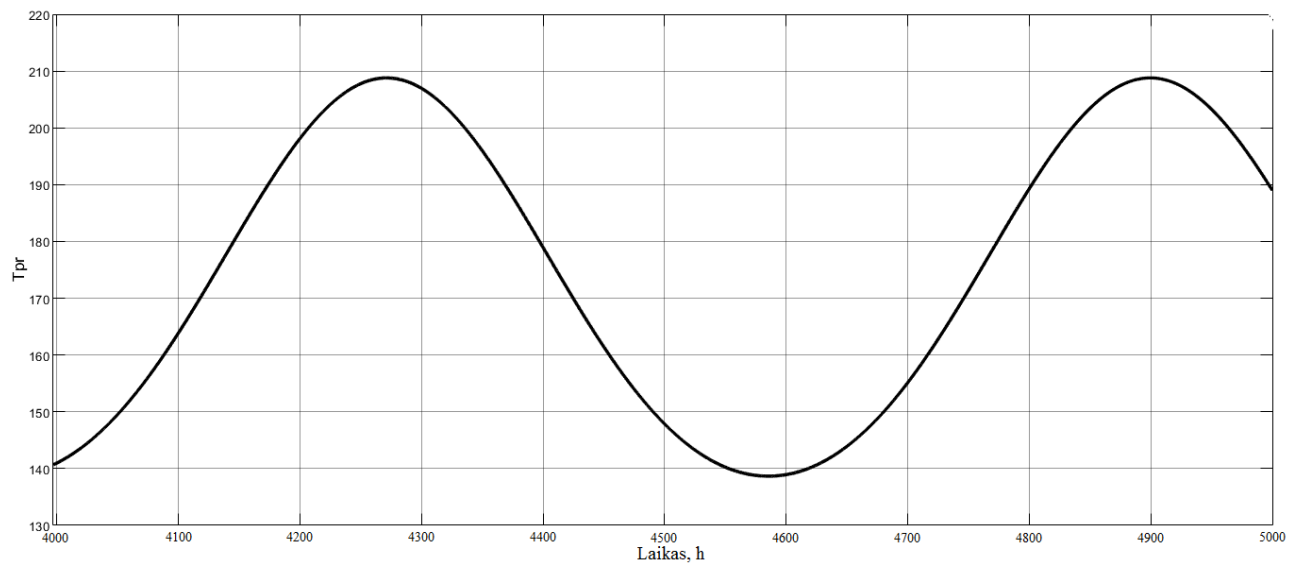


Proceso dinaminių parametų kitimo laiko trajektorijos:

stiprinimo koeficientas  $K_{pr}$



laiko pastovioji  $T_{pr}$



## 7 priedas. Nuostato sekimo tyrimo modelis

