

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

**Ernestas Balčiūnas**

**BIOKURO KATILO VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS IR**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
Prof. Donatas Levišauskas

**KAUNAS, 2017**

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

**BIOKURO KATILO VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS IR**  
**TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

**Vadovas**

Prof. Donatas Levišauskas

**Recenzentas**

Prof. Vytautas Galvanauskas

**Projektą atliko**

Ernestas Balčiūnas

**KAUNAS, 2017**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektors ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Ernestas Balčiūnas

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologija (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamasis magistro projektas

“Biokuro katilo temperatūros valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas”

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Ernesto Balčiūno, baigiamasis darbas tema „Biokuro katilo valdymo sistemos sudarymas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam neesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Balčiūnas, Ernestas. Biokuro katilo valdymo sistemos sudarymas ir tyrimas. *Valdymo sistemų magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai.

Reikšminiai žodžiai: biokuras, kaloringumas, vanduo, adaptyvi, valdymo, sistema, temperatūra.

Kaunas, 2017. 67 p.

## SANTRAUKA

Darbo tikslas – sukurti adaptyvią vandens šildymo katilo temperatūros reguliavimo sistemą ir atlikti jos tyrimą.

Magistro baigiamajame darbe analizuojamas biokuro katilas, skirtas termofikacinio vandens pašildymui, biokuro katilo technologinis procesas. Sudaryta ir iširta termofikacinio vandens temperatūros adaptyvaus valdymo sistema.

Sudarytas valdomo proceso būsenos modelis, regulatoriaus parametrų adaptacijos algoritmas paremtas šildomo vandens tūrinio srauto matavimu ir netiesioginiu biokuro kaloringumo įvertinimu. Sudaryta adaptyvios valdymo sistemos modeliavimo schema ir atliktas sistemos veikimo imitacinis modeliavimas sekant temperatūros nuostato pokyčius ir kompensuojant trikdančiuosius pokyčius. Adaptyvios sistemos modeliavimo rezultatai palyginti su vienkontūrės valdymo sistemos su pastoviai regulatoriaus derinimo parametrais veikimo rezultatais.

Pateiktos valdymo sistemų reakcijos kreivės ir pereinamųjų procesų kokybės rodikliai. Darbo rezultatai apibendrinti išvadose ir rekomendacijose.

Balčiūnas, Ernestas. Development and Investigation of Biofuel Boiler Control System. *Master's thesis in Control System.*/ supervisor prof. Donatas Levišauskas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of automation.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: biofuel, calorific, water, adaptive, control, system, temperature.

Kaunas, 2017. 67 p.

## **SUMMARY**

Project's goal is to develop biofuel boiler's control system and conduct system investigation.

The work examines biofuel boiler which is used to heat thermofication water, biofuel boiler technological process. Develop and investigate heating water temperature adaptive control system.

Composed controlled process state model, regulator parameters adaptation algorithm based on waters flow rate and indirect assessment of biofuel calorific. Developed adaptive control systems model scheme and conducted system operation simulation tracking changes in temperature changes. Adaptive control system simulations results are compared with ordinary control system which use permanent parameters.

Control systems response curves and transition process quality indicators. The results are summarized in the conclusions and recommendations.

# Turinys

Įvadas .....	7
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	8
1.1 Technologinė įranga .....	8
1.1.1 Vandens šildymo katilas .....	8
1.1.2 Biokuro pakura.....	9
1.1.3 Valdymo sistemos elementai .....	11
1.1.4 Matavimo įtaisai.....	11
1.2 Biokuro savybių analizė .....	12
1.2.1 Kuro sąvoka ir klasifikavimas.....	12
1.2.2 Medienos kaip kietojo biokuro panaudojimas .....	13
1.2.3 Medienos šiluminės savybės.....	13
1.3 Biokuro katilo valdymui tinkamų sistemų apžvalga .....	15
1.3.1 Grįžtamojo ryšio automatinio reguliavimo sistema .....	15
1.3.2 Adaptyvusis valdymas taikant stiprinimo numatymą .....	16
2. VIENKONTŪRĖS VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS .....	17
2.1 Tiriamo technologinio proceso automatinio valdymo sistema .....	17
2.1.1 Esama termofikacinio proceso automatinio valdymo sistema .....	18
2.1.2 Naujai projektuojama termofikacinio vandens temperatūros ARS.....	19
2.2 Matematinio modelio kūrimas.....	20
2.2.1 Matematinio modelio lygčių sudarymas .....	20
2.2.2 Proceso imitacinio modelio kūrimas.....	24
2.2.3 Imitacinio modelio reakcija į trikdančius poveikius .....	26
2.3 Vienkontūrė valdymo sistema .....	28
2.3.1 Vienkontūrės valdymo sistemos modelio sudarymas .....	29
2.3.2 Vienkontūrės valdymo sistemos tyrimas .....	30
2.3.3 Reguliavimo kokybės palyginimas .....	36
3. ADAPTYVIOS VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS IR TYRIMAS.....	38
3.1 Technologinio proceso eksperimentinis tyrimas.....	39
3.2 Polinominių modelių sudarymas.....	46
3.3 Adaptyvios valdymo sistemos modelio sudarymas .....	52
3.4 Adaptyvios valdymo sistemos tyrimas .....	56
Išvados .....	65
Literatūros sąrašas.....	66

## Įvadas

Vis dažniau pramoninės įmonės, katilinės turi patobulinti savo darbo, gamybos efektyvumą, kad atitiktų keliamus vyriausybės reikalavimus. Tai ne vienintelė priežastis, dėl kurios pramoninės įmonės tobulina savo technologinius procesus ir įrenginius, matavimo ir reguliavimo sistemas. Tobulinant katilinių įrangą siekiama pagerinti ne tik įmonės darbo efektyvumą, tačiau taip pat sumažinti nuostolių ir aplinkos taršos rodiklius, užtikrinti norimus valdomo objekto statinius ir dinامينius rodiklius.

Šiuo metu plačiausiai yra naudojamos įprastos vienkontūrės valdymo sistemos su pastoviai suderintu reguliatoriumi. Tačiau šios sistemos ne visados užtikrina kokybišką proceso reguliavimą. Vienas iš pavyzdžių galėtų būti biokuro katilas, skirtas termofikacinio vandens pašildymui. Biokuro kaloringumas ir termofikacinio vandens apkrova gali kisti plačiuose diapazonuose, t.y. sistemą paveikia trikdomieji poveikiai. Vienkontūrės valdymo sistemos ne visada užtikrina tinkamą sistemos reakciją į šiuos trikdomuosius poveikius.

Šiame baigiamojo magistro projekte bus bandoma sudaryti adaptyvia valdymo sistemą, kuri atliktų reguliatoriaus derinimo parametrų adaptaciją. Parametrų adaptacija yra įvertinama atsižvelgiant į biokuro katilo apkrovos ir netiesiogiai apskaičiuoto biokuro kaloringumo vertes. Adaptyvios valdymo sistemos veikimo rezultatai bus palyginami su vienkontūrės valdymo sistemos rezultatais.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1 Technologinė įranga

Kaip jau buvo minėta anksčiau, pagrindiniai elementai, sudarantys vandens šildymo sistemą, yra šildymo katilas ir pakura su judančiu ardynu. Šiame skyriuje bus apžvelgiami biokuro katilo ir pakuros veikimo principai, techniniai rodikliai.

### 1.1.1 Vandens šildymo katilas

Remiantis „Slėginių įrenginių techniniu reglamentu“, slėginiai įrenginiai, šiuo atveju vandens šildymo katilas, gali būti priskirti I, II, III ar IV kategorijai. Kiekvienas slėginis įrenginys yra priskiriamas atitinkamai kategorijai atlikus tam tikrus bandymus ar atsižvelgus į jo parametrus, charakteristikas [2]. Atliekant eksperimentinę magistrinio darbo dalį bus naudojamas vandens šildymo katilas, kuris priklausys IV kategorijai.

Vandens šildymo katilas yra plieninis, vertikalus dūmų vamzdžių katilas – tai įrenginys, skirtas šiluminės energijos ir karšto vandens gamybai iš kietojo biokuro. Jo paskirtis – paruošti karštą vandenį centralizuoto šilumos tiekimo sistemai [3].

**1 lentelė.** Vandens šildymo katilo techniniai rodikliai

Rodiklio pavadinimas	Mato vienetas	Dydis
Nominalus šiluminis galingumas	MW	8
Didžiausia leistina vandens temperatūra	°C	130
Mažiausia leistina į katilą grąžinamo vandens temperatūra	°C	70
Didžiausias leistinas slėgis	Bar	6
Hidraulinio bandymo slėgis	Bar	8.6
Apkrovimo reguliavimo diapazonas	MW	2.4 – 8
Naudingo veikimo koeficientas	%	≥85
Vamzdelių skaičius vandens šildymo katile	vnt.	700
Vamzdelio ilgis	m	7
Vamzdelio skerspjūvio plotas	m <sup>2</sup>	0,00385

### Technologiniai vamzdynai

Termofikacinio vandens vamzdynai yra gaminami iš tiesiasiūlių suvirintų plieno vamzdžių, tinkamų naudoti esant slėgiui. Kiekvienas vamzdynas turi atitikti technines sąlygas. 2 lentelėje yra pateikiami termofikacinio vandens, grįžtančio iš šilumos tinklų, techniniai parametrai, o 3 lentelėje – vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus [5].



**2 lentelė.** Termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto šilumos tinklų, vamzdyno techniniai parametrai

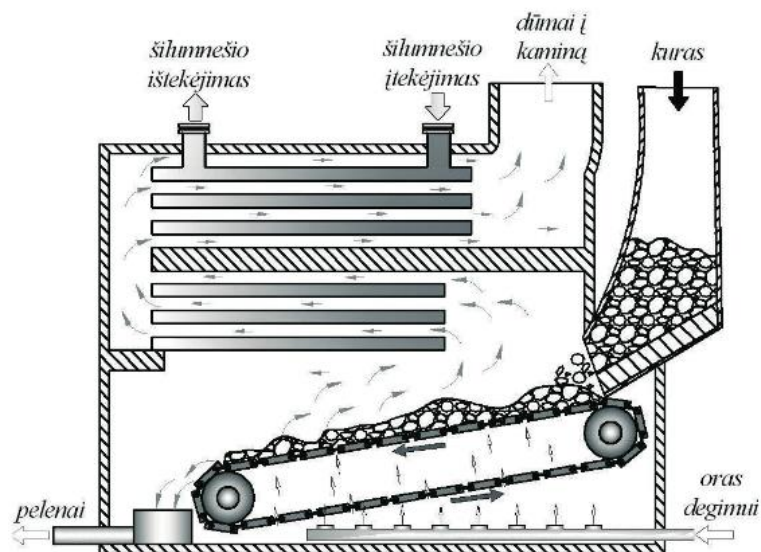
Žymėjimas	DN	Darbinė temperatūra, °C	Maksimali temperatūra, °C
T21	250	70	130

**3 lentelė.** Termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklų, vamzdyno techniniai parametrai

Žymėjimas	DN	Darbinė temperatūra, °C	Maksimali temperatūra, °C
T11	200	125	130

### 1.1.2 Biokuro pakura

Biokuro pakura su judančiu ardynu yra skirta įvairių rūšių biokurui: medienos skiedroms, smulkintoms atliekoms, žievėms deginti. Pakuros konstrukcija turi būti tinkama komplektuoti su įvairiais šalia pakuros statomais katilais ir kita įranga, kad nekiltų avarinės situacijos, nepakenktų technologiniam procesui. Biokuro pakuros su judančiu ardynu techniniai rodikliai pateikiami 4 lentelėje. Kietojo kuro deginimo judančio sluoksnio katilė schema pateikta 1 paveikslėlyje [6].



**1 pav.** Kietojo kuro deginimo judančio sluoksnio katilė schema

#### Biokuro pakuros pagrindinės dalys

- metalinis pakuros rėmas ir plieninis korpusas su apžiūros durelėmis;
- mūras, sudarantis pakuros sienas ir skliautą;
- izoliacinis sluoksnis;
- kuro padavimo ant ardyno žertuvai, valdomi hidrauliškai;
- judamas ardynas su aukštai temperatūrai atsparaus ketaus ardeliais;

- oro padavimo sistema, susidedanti iš pirminio ir antrinio/tretinio oro ventiliatorių ir kanalų su užsklandomis;

- pakuros kuro bunkerio su kuro lygio jutikliais;
- pagrindinis pelenų šalinimo kanalas su žertuvais ir angomis pakuros šonuose;
- kuro bunkerio priešgaisrinė sistema;
- pakurų aušinimo sistema.

### **Oro tiekimo įranga**

Visas oras reikalingas biokurai sudeginimui yra suskirstytas į pirminį, antrinį ir tretinį.

Pirminis oras užtikrina oro kiekį, reikalingą kurui ant ardyno sudeginti ir tuo pačiu metu aušina ardyną, kad ardyno temperatūra neviršytų leistinos. Pirminis oras paduodamas į kameras po ardynu. Oras pro ardelių plyšius patenka į degimo zoną.

Antrinis oras paduodamas į degimo zoną virš ardyno per specialias angas. Jo paskirtis – tinkamai sumaišyti ir sudeginti dujas – lakiuosius komponentus, išsiskyrusius iš biokuro.

Tretinis oras paduodamas į degimo produktų srautą specialioje kameroje prieš išeinant į katilo ertmę. Tretinio oro paskirtis – iki galo sudeginti degiuosius komponentus.

### **Judantis ardynas**

Visas ardynas susideda iš judamų ir nejudamų ardelių eilių, kurios sudaro laiptuotą sistemą, einančią žemyn. Ardelių judinimas yra vykdomas hidrauliniiais cilindrais. Jų pastūmimo ilgis gali kisti taip 0 – 200 mm., priklausomai nuo katilo apkrovimo ir degimo parametrų. Kiekvienas cilindras judina vieną arba dvi ardelių eiles. Tai užtikrina tolygų biokuro perstūmimą ardyno zonomis ir skirtingais greičiais kiekvienoje zonoje atskirai, tylų ir patikimą veikimą. Net ir sugedus keletui cilindrų katilas galės dirbti ir bus garantuotas perstūmimas ardynu bei kokybiškas jo sudeginimas. Hidraulinė stotis yra nuolatos reguliuojama valdymo sistema. Galia reguliuojama nuo 0 iki 100 procentų [7].

### **Biokuro tiekimas į pakurą**

Biokuras iš sandėlio grandikliniais transporteriais tiekiamas į pakuros kuro bunkerį, kuriame yra lygio jutikliai. Pagal biokuro kiekį bunkeriuose paleidžia arba stabdo transporterių bei sandėlio žertuvų darbą.

Kuras iš pakuros bunkerių hidrauliniiais žertuvais stumiamas (žertuvo darbas pagal reikiamą pakuros galingumą reguliuojamas automatiškai) ir patenka ant kūryklos judamo ardyno. Nuo jo biokuras toliau tiekiamas į kamerą, kurioje vyksta degimo procesas.

Biokuro pakuros su judančiu ardynu techniniai rodikliai pateikiami 4 lentelėje [4].

**4 lentelė.** Biokuro pakuros su judančiu ardynu techniniai rodikliai

Rodiklio pavadinimas	Mato vienetas	Dydis
Nominalus šiluminis galingumas	MW	9.5
Medienos dujofikavimui pakuroje palaikoma temperatūra	°C	850 - 1050
Pritaikyta deginti biokurą, kurio drėgmė	%	30 - 60
Ardynas	Judamas, laiptuotas	
Kuro bunkeris	m <sup>3</sup>	1.8
Kuro sunaudojimas (kai žemutinė degimo šiluma 1.952 MWh/t, drėgnumas 52%)	Kg/h	9.644
Pakuros tūris	m <sup>3</sup>	100
Plokštelės storis	m	0,02
Visas plokštelių plotas	m <sup>2</sup>	77
Plokštelės medžiagos šiluminis laidumas	W/(°C×m)	16

### 1.1.3 Valdymo sistemos elementai

Be reguliavimo ir vykdymo įtaisų nebūtų galima užtikrinti tinkamo sistemos reguliavimo. Matavimo prietaiso matavimai yra perduodami į reguliatorių. Reguliavimo įtaisas pagal atitinkamą dėsnį (P, I, PI, PD, PID) apskaičiuoja reguliavimo poveikį ir vykdymo įtaisą, kurį sudaro vykdyklis ir poveikio elementas, atkuria nuo nuostato nukrypusią objekto reguliuojamojo parametro vertę [1].

### 1.1.4 Matavimo įtaisai

Technologinio proceso parametrą matuoti yra naudojami jautrieji elementai (jutikliai). Jutikliai – tai pirminis sistemos elementas, priimančias informaciją iš objekto. Pavyzdžiui, termopora, varžinis termometras, membraninis manometras, srauto matavimo jautrusis elementas [1].

Jutiklių parodymai yra perduodami į valdymo įtaisą, kuris perduoda tam tikrą signalą į vykdyklį ir taip reguliuojama sistema. Dažniausiai jautriųjų elementų signalai skiriasi nuo signalų, kuriuos gali priimti valdikliai ar vykdykliai.

Toliau šiame skyriuje bus aprašyti matavimo prietaisai, kurie bus naudojami kuriant matematinį modelį.

#### Temperatūros jutikliai

Kuriant matematinį modelį bus naudojami du panardinami ESMU – 100 (Pt1000) temperatūros jutikliai. Pirmasis bus naudojamas matuoti termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto šilumos tinklų, temperatūrai, o antras skirtas matuoti deaeruooto vandens, tiekiamo į šilumos tinklus, temperatūrai.

## **Srauto jutikliai**

Matematiniam modelyje bus naudojamas vienas ultragarsinis SONO 1500 CT srauto jutiklis, kuris matuos termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, debitą. Žinant šio srauto dydį bus galima apskaičiuoti judančiu ardynu tiekiamo biokuro kaloringumo dydį.

## **1.2 Biokuro savybių analizė**

Pastaraisiais metais biokuro naudojimas nuolat auga. Turimos šiuolaikiškos biokuro gamybos ir deginimo technologijos leidžia efektyviai naudoti praktiškai visas miško bei medienos perdirbimo pramonės atliekas [8].

Šiame skyriuje bus bendrai supažindinta su kuro sąvoka ir klasifikavimu, kietuoju kuru (mediena) ir tiriamame procese naudojamu biokuro savybėmis.

### **1.2.1 Kuro sąvoka ir klasifikavimas**

Kuru vadinama bet kuri medžiaga techniškai ir ekonomiškai apsimokanti dideliems šilumos kiekiamis gauti.

Šiuo metu naudojamas organinis ir branduolinis kuras. Iš organinio kuro šiluma išsiskiria, sparčiai oksiduojantis – degant degiesiems kuro elementams, o iš branduolinio kuro ji išsiskiria, skylant kai kurių sunkiųjų elementų izotopų branduoliams.

Pagal fizinę būseną organinis kuras skirstomas į kietąjį, skystąjį ir dujinį. Prie kietojo kuro priskiriama mediena, durpės, rusvosios ir akmens anglys, antracitas, koksas, skalūnai ir kt. Skystasis kuras yra nafta, mazutas, žibalas, benzinas, dyzelinas, skalūnų alyva, akmens anglių dervos. Prie dujinio kuro priklauso gamtinės, naftos, suskystintosios, generatorių, koksavimo, aukštakrosnių dujos ir kt.

Atsižvelgiant į gavimo būdą, kuras skirstomas į natūralų ir dirbtinį. Natūraliu vadinamas kuras, gaunamas iš natūralių kuro šaltinių, pavyzdžiui, durpės, rusvosios ir akmens anglys, antracitas, gamtinės dujos, nafta, taip pat mediena. Prie dirbtinio priskiriamas kuras, gautas chemiškai ar mechaniškai perdirbus natūralų kurą, pavyzdžiui, medžio anglys, koksas, benzinas, žibalas, mazutas, generatorių, aukštakrosnių ir koksavimo krosnių dujos, kietojo ir skystojo kuro atliekų briketai.

Pagal naudojimą kuras sąlygiškai skirstomas į energetinį ir technologinį. Energetinis kuras naudojamas šiluminei ir elektros energijos gamybai, technologinis – įvairiose pramoninėse krosnyse, taip pat kaip žaliava chemijos pramonėje. Tokių rūšių kuras kaip mediena, didelė

akmens anglių ir naftos dalis, iš kurių galima gauti daug vertingų produktų, priklauso prie neenergetinio kuro. Kuras, kuris kaip žaliava chemijos pramonei netinkamas (durpės, rusvosios anglys, žemos kokybės akmens anglys, antracitas, sieringas mazutas bei kuro technologinio perdirbimo atliekos), deginamas energetiniuose įrenginiuose [9].

### 1.2.2 Medienos kaip kietojo biokuro panaudojimas

Kietasis biokuras – iš medienos ar kitų biokuro rūšių pagaminti degūs kietieji produktai (miško bei medienos atliekos, malkos, šiaudų, linų – spalų ir kitų rūšių biologinės kilmės – žemės ūkio atliekos ir augalai), naudojami energijai gaminti. Mediena yra viena iš populiariausių kietojo biokuro rūšių.

Mediena kaip kuras naudojama tik mažose ir vidutinės galio katilinėse. Dažniausiai deginamos medžio apdirbimo atliekos: pjuvenos, drožlės, lentgaliai, žievės. Pastaraisiais metais pradėta naudoti specialiomis kapoklėmis susmulkinti medienai.

Įvairių medžių veislių medienos degiosios masės sudėtis maždaug panaši. Joje anglies yra apie 50%, vandenilio – 6%, deguonies - 40%. Medienos kaloringumas mažai priklauso nuo medžių veislės, bet priklauso nuo jos drėgmės. Naudojamosios masės kaloringumas paprastai nesiekia 12500kJ/kg. Lakiųjų medžiagų išėiga deginant medieną labai didelė (85%), todėl ją lengva uždegti ir deginti. Dėl šios priežasties mediena dažnai pasirenkama katilams užkurti, naudojant kitų rūšių kurą.

Medienos kuro išteklių dideli: medienos ruošos atliekos (šakos ir viršūnės) sudaro 1,4 mln. m<sup>3</sup>, medienos perdirbimo atliekos – 0,6 mln. m<sup>3</sup>, malkinė mediena 1,0 mln. m<sup>3</sup> [9].

### 1.2.3 Medienos šiluminės savybės

**Biokuro drėgnis.** Drėgnis – tai vandens kiekis kure. Biokuras, ypač mediena, gerai sugeria vandenį. Drėgmė biokure gali kisti plačiose ribose nuo 0 iki  $\geq 70\%$  kuro naudojamosios masės. Esant didelei drėgmei, biokurą sunkiau uždegti, mažesnis jo kaloringumas, nes kure esančiam vandens kiekiui išgarinti suvartojama dalis degimo metu išsiskyrusios šilumos. Deginant drėgną medieną, mažėja kūryklos temperatūra, blogėja šilumos mainai. Todėl vienas iš svarbiausių kietojo biokuro kokybės parametrų yra jame esantis drėgmės kiekis. Kuro drėgnumas paprastai charakterizuojamas santykine drėgme, t.y. drėgmės kiekis išreikštas procentais nuo kuro naudojamosios masės [10].

5 lentelėje pateikiamas įvairios rūšies medienos kaloringumo dydis esant įvairiems drėgnumams, piltiniams ir rietuviniams tankiams.

Kaip matyti iš 5 lentelėje pateiktų duomenų, energijos tankis gerokai mažiau priklauso nuo kuro drėgnumo lygio negu jo energetinė vertė, nustatyta naudojamosios masės vienetui. Šioje lentelėje pateikti duomenys mišriai medienai lapuočių atveju atitinka 50% alksnių ir 50% drebulių, o spygliuočių – 50% eglė ir 50% pušų [11].

**5 lentelė.** Smulkintos medienos šilumingumas esant įvairiems kuro drėgnumams

Drėgnumas, %	Beržo mediena		Mišrūs lapuočiai		Mišrūs spygliuočiai	
	Piltinis tankis	Rietuvinis tankis	Piltinis tankis	Rietuvinis tankis	Piltinis tankis	Rietuvinis tankis
Energijos tankis kWh/m <sup>3</sup>						
0	1040	1750	790	1330	830	1380
10	1030	1730	780	1310	810	1360
20	1010	1700	760	1280	800	1340
30	990	1660	740	1250	780	1310
40	970	1620	720	1200	760	1270
50	930	1550	680	1140	720	1200
Energijos tankis MJ/m <sup>3</sup>						
0	3744	6300	2844	4788	2988	4968
10	3708	6228	2808	4716	2916	4896
20	3636	6120	2736	4608	2880	4824
30	3564	5976	2664	4500	2808	4716
40	3492	5832	2592	4320	2736	4572
50	3348	5580	2448	4104	2592	4320

**Kuro peleningumas.** Likutis, susidarantis kurui sudegus, vadinamas pelenais. Kuro peleningumas priklauso nuo mineralinių medžiagų, esančių biokuro masėje arba patenkančių į jį ruošiant, transportuojant bei sandėliuojant. Kuro peleningumas ir pelenų savybės turi didelės įtakos katilų eksploatavimui. Esant dideliame kuro peleningumui greičiau užnešami katilo konvektyviniai paviršiai ir todėl mažėja katilo efektyvumas. Esant žemai pelenų lydymosi temperatūrai, jie pradeda lydintis, sudarydami šlakus ir gali sutrikdyti normalų ardymo funkcionavimą [10].

**Biokuro kaloringumas.** Kietojo biokuro kaloringumas priklauso nuo jo cheminės sudėties, t.y. nuo celiuliozės, hemiceliuliozės, lignino ir kitų medžiagų tarpusavio santykio. Būtina skirti dvi kuro kaloringumo reikšmes – aukštutinę naudojamosios masės degimo šilumą ir žemutinę degimo šilumą. Aukštutinę degimo šilumą apskaičiuojama įvertinant šilumos kiekį, kuris išsiskiria kondensuojantis degimo produktuose esantiems vandens garams (išsiskyrusiems dėl medienos drėgnumo ir susidariusiems degant vandeniliui). Įprastiniuose katiluose kondensavimosi šiluma prarandama, kadangi degimo produktai patenka į dūmtraukį,

esant aukštesnei nei 100°C temperatūrai. Todėl biokuro naudojamosios masės, deginamos tokiuose katiluose, kaloringumui apibūdinti naudojamos žemutinės degimo šilumos rodiklis [10].

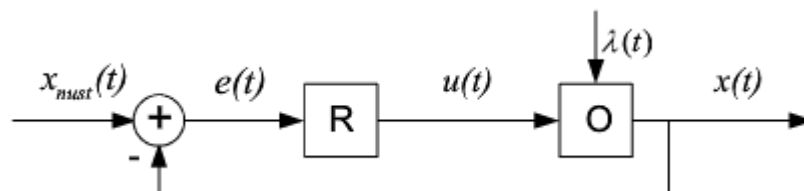
### 1.3 Biokuro katilo valdymui tinkamų sistemų apžvalga

Valdymo ar reguliavimo sistemos esmė yra stebėti kintamuosius, rasti sprendimus, kaip efektyviai reguliuoti įėjimus, kad būtų galima gauti pageidaujamą išėjimą. Valdymo sistemos užduotis sąlygiškai galime suskirstyti į tris dalis [12]:

1. Išėjimo kintamųjų stebėjimas juos matuojant.
2. Racionalių valdymo sprendimų priėmimas ar algoritmų taikymas, atsižvelgiant į situaciją ir remiantis informacija apie esamą ir pageidaujamą sistemos būseną.
3. Efektyvus tokių sprendimų įgyvendinimas.

#### 1.3.1 Grįžtamojo ryšio automatinio reguliavimo sistema

Kiekvieną automatinio reguliavimo sistemą (ARS) galima atvaizduoti struktūriniu schema, pateikta 2 paveikslėlyje, sudaryta iš regulatoriaus ir reguliavimo objekto. Šiuo atveju reguliatorius apima keitiklį, momentinės ir nustatytosios parametro verčių palyginimo elementą, patį reguliatorių ir vykdymo įtaisą [1].



2 pav. Automatinio reguliavimo sistemos struktūrinė schema

Norint valdyti objektą, reikia suformuoti tokį valdymo poveikį  $u(t)$ , kuris reguliuojamąjį parametą  $x(t)$  keistų norimu tikslumu pagal tam tikrą dėsnį, nepriklausomai nuo trikdomojo poveikio  $\lambda(t)$ . Schemoje  $x_{nust}(t)$  yra nustatytasis poveikis, kuris gaunamas iš nustatymo įtaiso.  $e(t)$  yra skirtumas tarp nustatytosios  $x_{nust}(t)$  ir momentinės  $x(t)$  reguliuojamojo parametro verčių. Nors technologiniai procesai įvairūs, tačiau dauguma ARS yra sudaromos remiantis bendraisiais reguliavimo principais, t.y. nuokrypio kompensavimo sistemos, trikdžio kompensavimo sistemos, kombinuotosios sistemos ir adaptyviosios sistemos.

Automatinio reguliavimo principą lemia tai, kaip ir kokių pagrindu sistemoje formuojamas valdymo poveikis. Šis reguliavimo principas parenkamas atsižvelgiant į ARS paskirtį,

nustatytojo ir trikdomojo poveikių kitimo pobūdį, reguliavimo objekto stabilumą ir pan. 3 paveikslėlyje pateiktoje schemeje valdymo poveikis  $u(t)$  formuojamas kompensuojant technologinio parametro  $x(t)$  nuokrypį nuo nustatytosios jo vertės  $x_{nust}(t)$ . Ši sistema sudaryta grįžtamojo ryšio arba nuokrypio kompensavimo principu. Grįžtamoju ryšiu vadinamas ryšys, kuris informuoja apie reguliuojamojo objekto būseną, atitinkančią reguliuojamojo parametro momentinę vertę, perduodama iš sistemos išėjimo į reguliavimo įtaiso įėjimą. Grįžtamasis ryšys laikomas neigiamu, jeigu palyginimo elementas nustato nuokrypį iš tokios priklausomybės (1) [1]:

$$e(t) = x_{nust}(t) - x(t) \quad (1)$$

Esamoje technologinio proceso reguliavimo sistemoje valdymas vyksta pagal nuokrypio kompensavimo principą.

### 1.3.2 Adaptyvusis valdymas taikant stiprinimo numatymą

Įprastinės automatinio reguliavimo sistemos projektuojamos remiantis prielaida, kad valdomasis procesas darbo taško aplinkoje yra tiesinis. Pagrindinis ištiesinimo trūkumas yra tas, kad valdymo sistemos, suprojektuotos remiantis ištiesinta proceso dinamika, neužtikrina geros reguliavimo kokybės, o kai kuriais atvejais net stabilumo, kai sistemos būseną nukrypsta nuo pusiausvyros taško, kuriame suderintas reguliatorius. Vienas iš būdų pagerinti reguliavimo kokybę yra ištiesinti proceso dinamiką išilgai proceso būsenų trajektorijos, kuri nėra apribota lokalia funkcionavimo sritimi.

Vienas iš būdų spręsti valdymo problemas, susijusias su ištiesinimu, yra naudoti projektavimo procedūrą, vadinamą stiprinimo numatymų (ang. *gain scheduling*). Stiprinimo numatymo principu keičiami priklausomai nuo įvertinamų realiuoju laiku funkcionavimo sąlygų. Stiprinimo numatymo idėja pradžioje buvo naudojama skrydžių valdymo sistemose, bet šiuo metu vis plačiau taikoma technologiniams procesams valdyti. Taikant stiprinimo numatymą, žymus valdymo kokybės gerėjimas gali būti pasiektas net ir tada, kai panaudojami tik keli reguliatoriaus parametrų deriniai [13].

#### Stiprinimo numatymo sistemų projektavimas

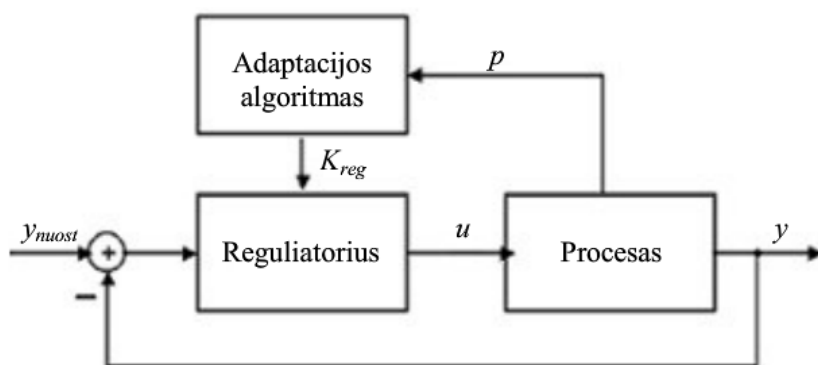
Projektuojant valdymo sistemos reguliatorių, kiekvienam iš  $n$  proceso pusiausvyros taškų, remiantis perdavimo funkcijomis (2) ir reguliatorių derinimo taisyklėmis, galima nustatyti atitinkamas reguliatoriaus parametrų vertes. Taip gaunama  $n$  reguliatoriaus parametrų rinkinių.



$$W_i(s) = \frac{\Delta Y_i(s)}{\Delta U_i(s)} = C(p_i)(sI - A(p_i))^{-1}B(p_i), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

čia  $s$  – Laplaso operatorius,  $\Delta Y_i(s)$ ,  $\Delta U_i(s)$  – išėjimo ir įėjimo kintamųjų nuokrypių nuo i-ojo pusiausvyros taško Laplaso transformacijos.

Kiekvienam rinkiniui priskiriama konkretų pusiausvyros tašką, atitinkantį parametro  $p$  vertę. Pvz, jei sistemoje naudojamas PID reguliatorius, tai sudaromas reguliatoriaus parametrų rinkinys  $K_r(p_i)$ ,  $T_i(p_i)$ ,  $T_d(p_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Taigi nepertraukiamai matuojant parametą  $p$ , galima tiesiogiai adaptuoti reguliatoriaus derinimo parametrus. Stiprinimo numatymu paremtos valdymo sistemos struktūra parodyta 3 paveikslėlyje [13].



**3 pav.** Stiprinimo numatymu paremtos valdymo sistemos struktūra

Valdymo sistemoje gali būti realizuota šuolinė arba nepertraukiama reguliatoriaus adaptacija. Pirmuoju atveju proceso būseną identifikuojančio parametro  $p$  kitimo diapazonas padalijamas į intervalus apie kiekvieną iš  $n$  stacionaraus būsenos taškų ( $p_{\min,i} < p_i < p_{\max,i}$ ,  $i=1, \dots, n$ ), naudotų projektuojant reguliatorių.

Antruoju atveju optimalių reguliatoriaus parametrų verčių sekos taškai  $K_{reg}(p_i)$ ,  $i=1, \dots, n$  interpoliuojami ir reguliatoriaus parametrai apskaičiuojami, remiantis interpoliacinėmis formulėmis.

## 2. VIENKONTŪRĖS VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS

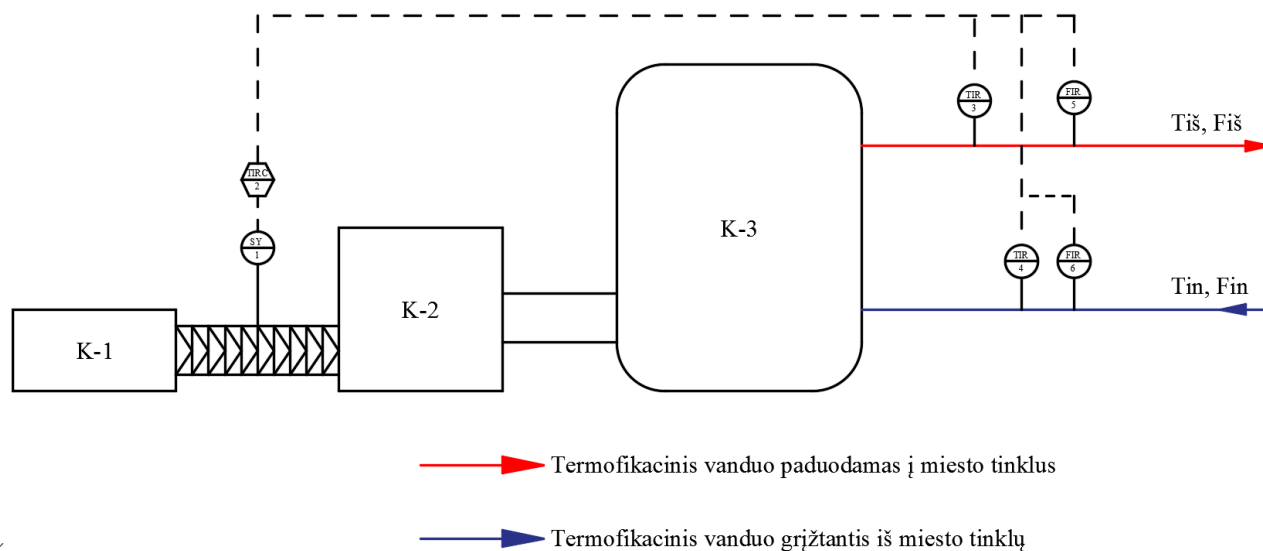
### 2.1 Tiriamo technologinio proceso automatinio valdymo sistema

Technologinės proceso schemos yra vienas iš pirmųjų realaus proceso įgyvendinimo etapų. Šiose schemose yra parodomi visi automatizuojamojo proceso įrenginiai ir vamzdynai. Įrenginiai braižomi supaprastintai, tačiau išlaikant įrenginių išorinių kontūrų proporcijas ir kiek

galima parodant veikimo principą. Taip pat pagal šias schemas yra sudaromas ir technologinis aprašas, kuris nupasakojo technologinio proceso veikimą.

### 2.1.1 Esama termofikacinio proceso automatinio valdymo sistema

Esama termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, pašildymo ir tiekimo atgal į miesto tinklus technologinė schema pateikiama 4 pav.



4 pav. Esamo technologinio proceso automatinio reguliavimo schema

#### Technologinis aprašas

Termofikacinis vanduo, grįžtantis iš miesto tinklų, yra tiekiamas į vandens šildymo katilą (K-3), kuriame jis yra pašildomas iki tam tikros nustatytos temperatūros. Šiluma, skirta vandeniui pašildyti, yra tiekama iš pakuros (K-2), kuri išgauti šilumai naudoja biokurą, tiekiamą iš biokuro bunkerio (K-1) judančiu ardynu. Pašildytas termofikacinis vanduo toliau yra grąžinamas atgal į miesto tinklus.

Grąžinamo termofikacinio vandens temperatūra yra reguliuojama valdant tiekiamo biokuro kiekį, t.y. biokuro masės srautą  $F_B$ . Termofikacinio vandens, grąžinamo į miesto tinklus, temperatūrą matuoja jutiklis TIR3, o srautą – FIR5. Termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūrą matuoja temperatūros jutiklis TIR4, srautą – FIR6.

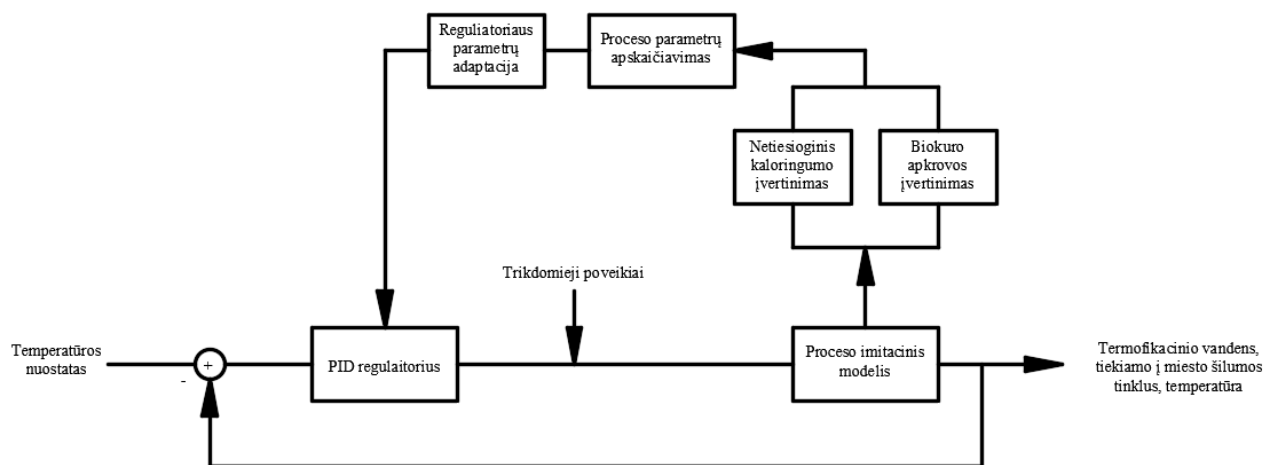
Visų jutiklių matavimai yra perduodami į reguliatorių TIRC2, kuris pagal parinktą reguliavimo dėsnį reguliuoja judančio ardyno darbo našumą, t.y. tiekiamo biokuro srautą. Esant didesniai greičiui, į pakurą yra tiekama daugiau biokuro. Didesnis biokuro kiekis leidžia išgauti didesnę šilumos kiekį, kuris reikalingas sušildyti termofikacinį vandenį iki nustatytos temperatūros.

Dažniausiai biokuro katilo reguliavimui yra naudojama įprasta vienkontūrė valdymo sistema su pastoviai suderintu reguliatoriumi. Deja ši sistema ne visada užtikrina kokybišką proceso reguliavimą, nes biokuro kaloringumas ir katilo apkrova, pratekančio termofikacinio vandens srautas, gali kisti plačiame diapazone.

## 2.1.2 Naujai projektuojama termofikacinio vandens temperatūros ARS

Siekiant pagerinti biokuro katilo valdymo kokybę vietoje vienkontūrės valdymo sistemos yra naudojama adaptyvi valdymo sistema. Kadangi reguliatoriaus derinimo parametrai yra perskaičiuojami realiu laiku atsižvelgiant į šuolinius trikdamuosius poveikius ar šuolinių nuostato pokytį. Įvertinus šiuos pokyčius sistema perskaičiuoja reguliatoriaus derinimo parametrus ir taip palaiko kokybišką reguliavimo kokybę.

Baigiamajame magistro projekte bus kuriama adaptyvi valdymo sistema. Paveikus sistemą šuoliniais trikdomaisiais poveikiais reguliatoriaus parametrai bus perskaičiuojami atsižvelgiant į trikdomųjų poveikių dydžius. Adaptyvios valdymo sistemos struktūrinė schema pateikiama 5 pav.



5 pav. Adaptyvios valdymo sistemos struktūrinė schema

Pirmiausia įvertinama biokuro katilo apkrovos, pratekančio termofikacinio vandens srauto, vertė ir netiesiogiai apskaičiuojamas biokuro kaloringumas. Pagal šių dviejų dydžių vertes yra apskaičiuojami proceso parametrai pagal sudarytus polinominius modelius. Sekančiame etape vykdoma reguliatoriaus derinimo parametru adaptacija, parametrai yra apskaičiuojami taikant ITAE kriterijaus formules. Perskaičiuotos vertės yra naudojamos kompensuojant trikdamuosius poveikius.

## 2.2 Matematinio modelio kūrimas

Matematinis modeliavimas yra mokslinio tyrimo metodas, pagrįstas nagrinėjamų procesų tyrimu, naudojantis jų matematiniu aprašu. Technologinių objektų matematinis aprašas reikalingas parenkant optimalius jų darbo režimus, kuriant automatinio valdymo sistemas, projektuojant naujos konstrukcijos aparatus.

Šiame skyriuje bus pateikiama visa matematinio modelio sudarymo eiga. Pirmiausia bus sudaromas matematinės modelio lygtys. Po to bus priimamos matematinio modelio prielaidos ir apribojimai. Paskutiniame etape bus imitacinis proceso modelis.

### 2.2.1 Matematinio modelio lygčių sudarymas

Termofikacinio vandens šildymo proceso matematinio modelio lygtys buvo sudarytos taikant šilumos balanso dėsnį. Šilumos balanso dėsnį galima išreikšti:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Sistemoje kaupiamos} \\ \text{šilumos pokytis} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Į sistemą įnešamas šilumos} \\ \text{kiekis} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Iš sistemos išnešamas šilumos} \\ \text{kiekis} \end{array} \right]$$

Sistemoje kaupiamos šilumos pokytis yra aprašomas diferencialine lygtimi (3):

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{\text{įnešamas}} - Q_{\text{išnešamas}} \quad (3)$$

čia  $\frac{dQ}{dt}$  – sistemoje kaupiamos šilumos pokytis per tam tikrą laiką,  $J/s$ ,  $Q_{\text{įnešamas}}$  – į sistemą įnešamos šilumos kiekis,  $J/s$ ,  $Q_{\text{išnešamas}}$  – iš sistemos išnešamos šilumos kiekis,  $J/s$ .

#### 2.2.1.1 Pakuroje kaupiamas šilumos kiekis

Šilumos kiekio kaupimas pakuroje aprašomas diferencialine lygtimi (4):

$$\frac{dQ_P}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 \quad (4)$$

čia  $Q_P$  – sukauptas šilumos kiekis pakuroje,  $J/s$ ,  $Q_1$  – šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui,  $J/s$ ,  $Q_2$  – šilumos kiekis, reikalingas sušildyti termofikacinį vandenį,  $J/s$ ,  $Q_3$  – šilumos kiekis, kuris pašalinamas su dūmais,  $J/s$ ,  $Q_4$  – šiluminiai nuostoliai,  $J/s$ .

Šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui, yra apskaičiuojamas pagal lygtį (5):

$$\frac{dQ}{dt} = F_b K \quad (5)$$

čia  $F_b$  – biokuro masės srautas,  $kg/s$ ,  $K$  – biokuro kaloringumas,  $J/kg$ .

Naudojant 5 lygtį apskaičiuoti šilumos kiekį, gautą sudegus visam biokurui, negalima tiksliai įvertinti degimo trukmę, nes pagal šią lygtį biokuras sudega momentaliai. Dėl šios priežasties įvedama nauja lygtis (6), kurioje bus įvertinama ir biokuro sudegimo trukmė.

$$\frac{dQ_g}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = \frac{F_b K - Q_g}{T} \quad (6)$$

čia  $Q_1$  – šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui,  $J/s$ ,  $F_b$  – biokuro masės srautas,  $kg/s$ ,  $K$  – biokuro kaloringumas,  $J/kg$ ,  $T$  – biokuro sudegimo trukmė,  $Q_g$  – generuojamas šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui,  $J/s$ .

Šilumos kiekis, reikalingas sušildyti šildymo plokšteles, apskaičiuojamas pagal lygtį (7):

$$\frac{dQ_2}{dt} = \lambda S_p \frac{(T_p - \frac{T_{i\bar{s}} + T_{in}}{2})}{D} \quad (7)$$

čia  $Q_2$  – šilumos kiekis, reikalingas sušildyti šildymo plokšteles,  $J/s$ ,  $\lambda$  – šiluminis laidis,  $W/m \times ^\circ C$ ,  $S_p$  – šildomas plokštelės plotas,  $m^2$ ,  $D$  – sienelės storis,  $m$ ,  $T_p$  – pakuros temperatūra,  $^\circ C$ ,  $T_{in}$  – termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūra,  $^\circ C$ ,  $T_{i\bar{s}}$  – termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, temperatūra,  $^\circ C$ .

Šilumos kiekis, kuris yra pašalinamas kartu su išeinančiais dūmais, apskaičiuojamas pagal lygtį (8):

$$\frac{dQ_3}{dt} = F_d \rho_d c_d T_d \quad (8)$$

čia  $Q_3$  – šilumos kiekis, kuris yra pašalinamas kartu su išeinančiais dūmais,  $J/s$ ,  $F_d$  – pašalinamų dūmų srautas,  $m^3/s$ ,  $\rho_d$  – pašalinamų dūmų tankis,  $kg/m^3$ ,  $c_d$  – pašalinamų dūmų savitoji šiluma,  $J/(kg \times ^\circ C)$ ,  $T_d$  – pašalinamų dūmų temperatūra,  $^\circ C$ .

Kuriant matematinį modelį šiluminiai nuostoliai bus įvertinami procentaliai, t.y. šiluminiai nuostoliai sudarys 5 procentus visos šilumos, kuri yra gaunama sudegus biokurui. Šiluminiai nuostoliai apskaičiuojami pagal lygtį (9):

$$\frac{dQ_4}{dt} = 0,05Q_1 = 0,05F_bK \quad (9)$$

čia  $Q_4$  – šiluminiai nuostoliai,  $J/s$ ,  $Q_1$  - šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui,  $J/s$ ,  $F_b$  – biokuro masės srautas,  $kg/s$ ,  $K$  – biokuro kaloringumas,  $J/kg$ .

Įrašius (6), (7), (8) ir (9) lygtis į (4) gaunama diferencialinė lygtis (10), kuris bus naudojamas apskaičiuoti šilumos kiekio pokyčiui pakuroje:

$$\frac{dQ_P}{dt} = Q_g - \lambda S_p \frac{(T_P - \frac{(T_{i\dot{s}} + T_{in})}{2})}{D} - F_d \rho_d c_d T_d - 0,05F_bK \quad (10)$$

Diferencialinė lygtis (10) bus pirmoji lygtis, kuri bus naudojama kuriant proceso modelį, taikant Matlab/Simulink programinį paketą.

Sukauptas šilumos kiekis pakuroje gali būti apskaičiuojamas pagal lygtį (11):

$$Q_P = V_P T_P \rho_P C_P \quad (11)$$

čia  $V_P$  – pakuros tūris,  $m^3$ ,  $T_P$  – pakuroje esančio oro temperatūra,  $^{\circ}C$ ,  $\rho_P$  – pakuroje esančio oro tankis,  $kg/m^3$ ,  $c_P$  – pakuroje esančio oro savitoji šiluma,  $J/(kg \times ^{\circ}C)$ .

Įsistačius (11) lygtį į (10) ir atlikus matematinius prastinimus gaunama diferencialinė lygtis (12), kuri skirta apskaičiuoti temperatūros pokyčiui:

$$V_P \rho_P C_P \frac{dT_P}{dt} = Q_g - \lambda S_p \frac{(T_P - \frac{(T_{i\dot{s}} + T_{in})}{2})}{D} - F_d \rho_d c_d T_d - F_b K \times 0,05 \quad (12)$$

### 2.2.1.2 Vandens šildymo katile kaupiamos šilumos kiekis

Šilumos kiekio kaupimas vandens šildymo katile aprašomas diferencialine lygtimi (13):

$$\frac{dQ_K}{dt} = Q_{in} - Q_{i\dot{s}} \quad (13)$$

čia  $Q_K$  – sukauptas šilumos kiekis vandens šildymo katile,  $J/s$ ,  $Q_{in}$  – įnešamas šilumos kiekis,  $J/s$ ,  $Q_{i\dot{s}}$  – išnešamas šilumos kiekis,  $J/s$ .

Įnešamas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal lygtį (14):

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = Q_2 + F_{in}T_{in}q_{TV}c_{TV} \quad (14)$$

čia  $Q_{in}$  – įnešamos šilumos kiekis,  $J/s$ ,  $Q_2$  – šilumos kiekis, reikalingas sušildyti termofikacinį vandenį,  $J/s$ ,  $F_{in}$  – termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, srautas,  $m^3/s$ ,  $T_{in}$  – termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūra,  $^{\circ}C$ ,  $q_{TV}$  – termofikacinio vandens tankis,  $kg/m^3$ ,  $c_{TV}$  – termofikacinio vandens savitoji šiluma,  $J/(kg \times ^{\circ}C)$ .

Išnešamas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal lygtį (15):

$$\frac{dQ_{iš}}{dt} = F_{iš}T_{iš}q_{TV}c_{TV} \quad (15)$$

čia  $F_{iš}$  – termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, srautas,  $m^3/s$ ,  $T_{iš}$  – termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, temperatūra,  $^{\circ}C$ ,  $q_{TV}$  – termofikacinio vandens tankis,  $kg/m^3$ ,  $c_{TV}$  – termofikacinio vandens savitoji šiluma,  $J/(kg \times ^{\circ}C)$ .

Įrašius (14) ir (15) lygtis į (13) gaunama diferencialinė lygtis (16):

$$\frac{dQ_K}{dt} = \lambda S_p \frac{(T_p - \frac{(T_{iš} + T_{in})}{2})}{D} + F_{in}T_{in}q_{TV}c_{TV} - F_{iš}T_{iš}q_{TV}c_{TV} \quad (16)$$

Šilumos kiekis, kuris yra reikalingas pašildyti termofikacinį vandenį iki užduotos temperatūros, apskaičiuojamas pagal lygtį (17):

$$Q_K = V_K \rho_{TV} c_{TV} \left( \frac{T_{in} + T_{iš}}{2} \right) \quad (17)$$

čia  $V$  – vandens šildymo katilė esančio termofikacinio vandens, kurį reikia pašildyti, tūris,  $m^3$ ,  $q_{TV}$  – termofikacinio vandens tankis,  $kg/m^3$ ,  $c_{TV}$  – termofikacinio vandens savitoji šiluma,  $J/(kg \times ^{\circ}C)$ ,  $T_{in}$  – termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūra,  $^{\circ}C$ ,  $T_{iš}$  – termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, temperatūra,  $^{\circ}C$ . Termofikacinio vandens tūris apskaičiuojamas pagal lygtį (18):

$$V_K = n l S_v \quad (18)$$

čia  $V_K$  – termofikacinio vandens tūris vandens šildymo katile,  $m^3$ ,  $n$  – vamzdžių, kuriais teka termofikacinis vanduo, skaičius,  $l$  – vamzdžio ilgis,  $m$ ,  $S_v$  – vamzdžio skerspjūvio plotas,  $m^2$ .

Ištačius (17) ir (18) lygtis į (16) ir atlikus matematinius veiksmus gaunama nauja diferencialinė lygtis (19), kuri naudojama apskaičiuoti termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, temperatūros pokyčiui per laiką:

$$nlS_vq_{TV}c_{TV}\frac{dT_{i\check{s}}}{dt} = \lambda S_p \frac{(T_p - \frac{(T_{i\check{s}} + T_{in}))}{2})}{D} + F_{in}T_{in}q_{TV}c_{TV} - F_{i\check{s}}T_{i\check{s}}q_{TV}c_{TV} \quad (19)$$

Ši diferencialinė lygtis bus naudojama termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklus, temperatūrai apskaičiuoti ir taip pat bus antroji lygtis, kuri bus naudojama kuriant proceso imitacinį modelį, taikant Matlab/Simulink programinį paketą.

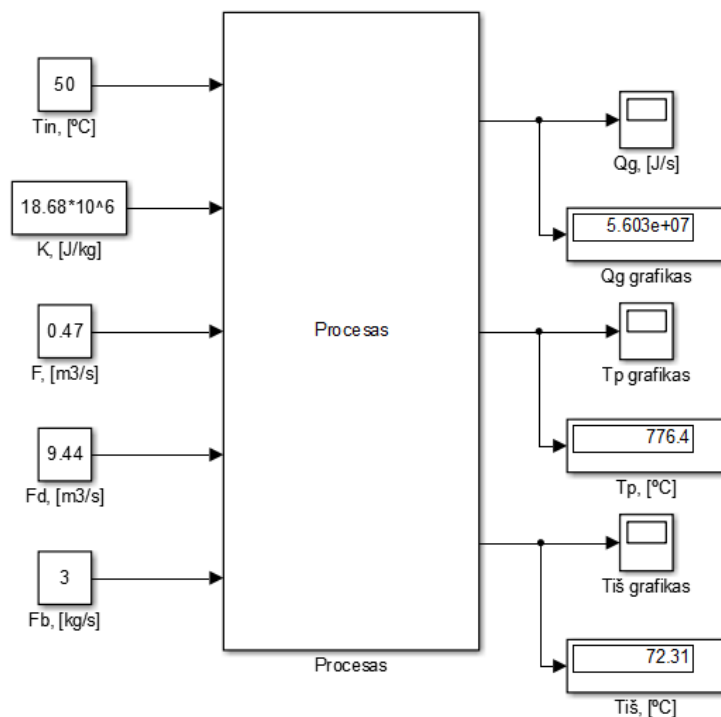
### 2.2.2 Proceso imitacinio modelio kūrimas

Matlab/Simulink programinėje aplinkoje modeliuojamas termofikacinio vandens pašildymo procesas (6 pav.). Modeliui aprašyti buvo naudojamas „Differential Equation Editor“ blokas (7 pav.), kuriame buvo įrašomos (6), (12) ir (19) lygtis. Proceso įėjimai ir išėjimai pateikiami 6 ir 7 lentelėse, fizikiniai ir konstrukciniai parametrai, kurie yra reikalingi realizuoti modelį, pateikiami 8 lentelėje.

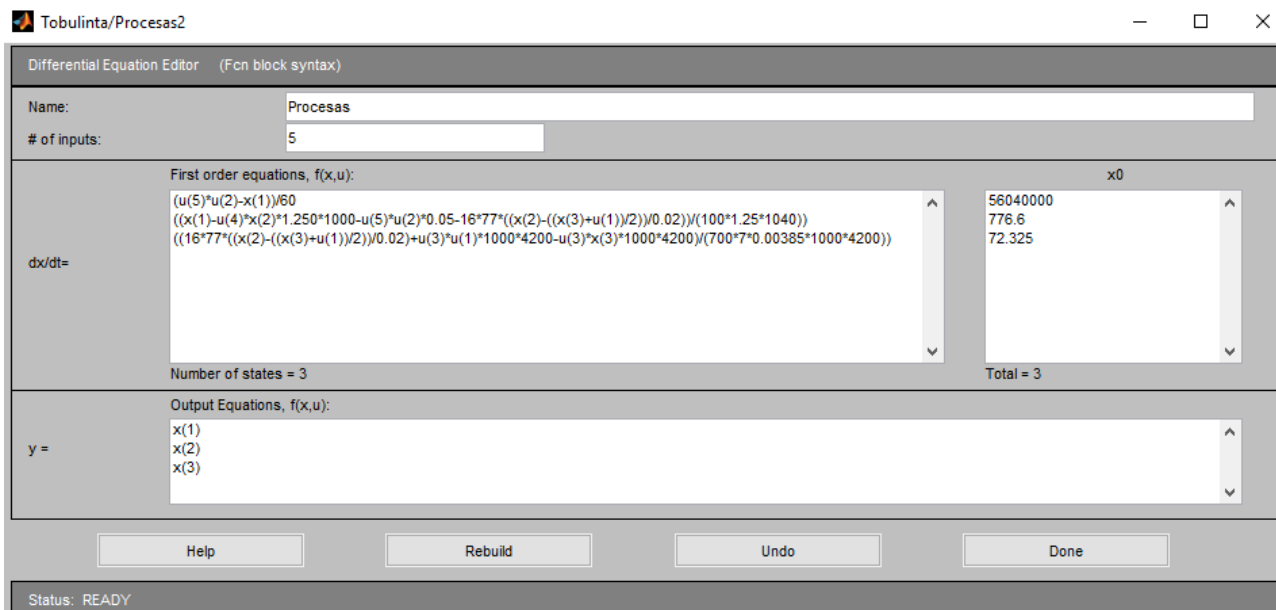
Kuriant matematinį modelį bus laikomasi šių prielaidų:

- termofikacinio vandens fizikiniai parametrai: tankis ir savitoji šiluma bus lygūs vandens fizikiniams parametrų;
- pašalinamų dūmų fizikiniai parametrai: tankis ir savitoji šiluma bus lygūs oro fizikiniams parametrų;
- termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūra bus pastovi;
- termofikacinio vandens srautai  $F_{in}$  ir  $F_{i\check{s}}$  yra vienodi.





6 pav. Termofikacinio vandens pašildymo proceso modelis



7 pav. Proceso modelio aprašymui naudotas „Differential Equation Editor“ blokas

6 lentelė. Proceso modelio įėjimai

Kintamasis	Aprašymas	Įėjimas
$T_{in}$	Termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto tinklų, temperatūra, °C	U(1)
$K$	Biokuro kaloringumas	U(2)
$F$	Termofikacinio vandens tūrinis srautas, m <sup>3</sup> /s	U(3)
$F_d$	Pašalinamų dūmų tūrinis srautas, m <sup>3</sup> /s	U(4)
$F_b$	Į pakurą tiekiamo biokuro masės srautas, kg/s	U(5)

**7 lentelė.** Proceso modelio išėjimai

Kintamasis	Aprašymas	Išėjimas
$Q_g$	Šilumos kiekis, gautas sudegus biokurui, J/s	X(1)
$T_p$	Sušildyto oro temperatūra pakuroje, °C	X(2)
$T_{i\bar{s}}$	Termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto tinklą, temperatūra, °C	X(3)

**8 lentelė.** Proceso modelio fizikiniai ir konstrukciniai parametrai

Žymėjimas	Aprašymas	Parametro vertė	Matavimo vienetas
$\rho_{TV}$	Termofikacinio vandens tankis	1000	kg/m <sup>3</sup>
$c_{TV}$	Termofikacinio vandens savitoji šiluma	4200	J/(kg×°C)
$\rho_d$	Pašalinamų dūmų tankis	1,250	kg/m <sup>3</sup>
$c_d$	Pašalinamų dūmų savitoji šiluma	1000	J/(kg×°C)
$V$	Pakuros tūris	100	m <sup>3</sup>
$n$	Vamzdelių skaičius vandens šildymo katile	700	
$l$	Vamzdelio ilgis	7	m
$S_V$	Vamzdelio skerspjūvio plotas	0,00385	m <sup>2</sup>
$d$	Plokštelės storis	0,02	m
$S_P$	Visas plokštelių plotas	77	m <sup>2</sup>
$\lambda$	Šiluminis laidumas	16	W/(°C×m)

### 2.2.3 Imitacinio modelio reakcija į trikdančius poveikius

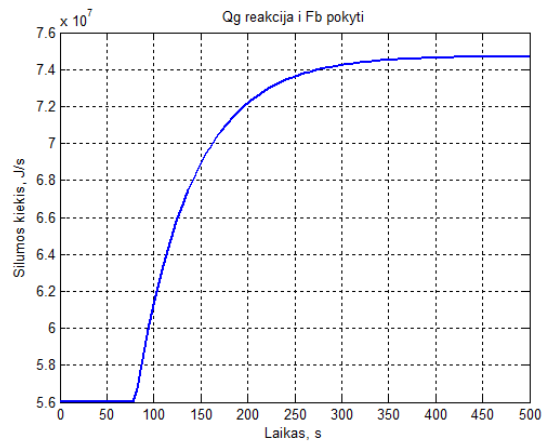
Technologinio proceso imitacinis modelis buvo išbandytas modelio įėjimus pakeitus šuoliškai. Buvo keičiami šie įėjimai: biokuro padavimo srautas  $F_b$ , termofikacinio srautas  $F$ , termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto šilumos tinklą, temperatūra, °C.

Visų bandymų metu buvo laikoma, kad proceso tiriami kintamieji yra nusistovėjęsios būsenos. Pradinės kintamųjų vertės:  $Q_g = 5,603 \times 10^7$  J/s,  $T_p = 776,4$  °C,  $T_{i\bar{s}} = 72,31$  °C.

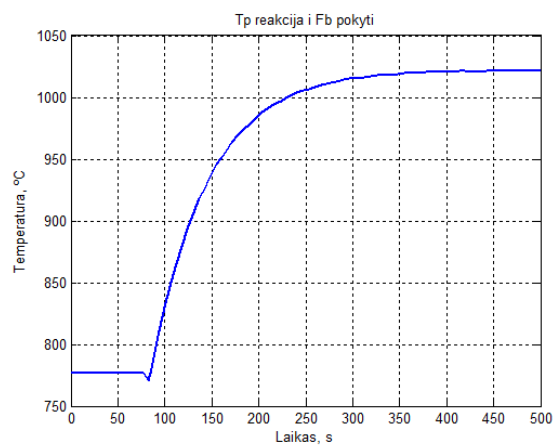
#### Biokuro srautas

8 pav. pateikiama termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklą, temperatūros  $T_{i\bar{s}}$  reakcija į pakeistą paduodamo biokuro masės srauto dydį. Modelio įėjimas šuoliškai pakeičiamas 50 modeliavimo sekundę, o biokuro srautas  $F_b$  padidėja iki 4 kg/s.

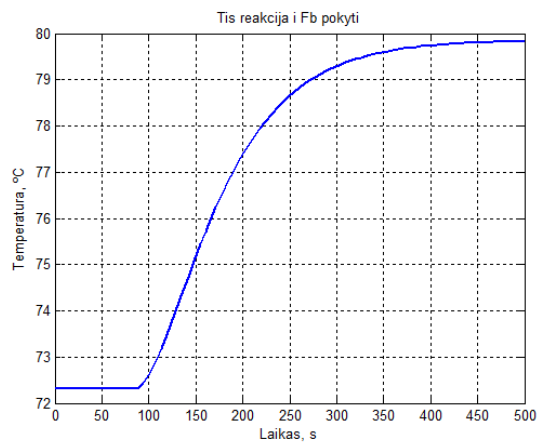
9 pav. pateikiama šilumos kiekio  $Q_g$ , gauto sudegus biokurui, reakcija pasikeitus modelio įėjimui (tiekiamo biokuro srautui), 10 pav. – pakūros temperatūros  $T_p$  reakcija.



8 pav. Šilumos kiekio, gauto sudegus biokurui, reakcija į biokuro srauto pokytį



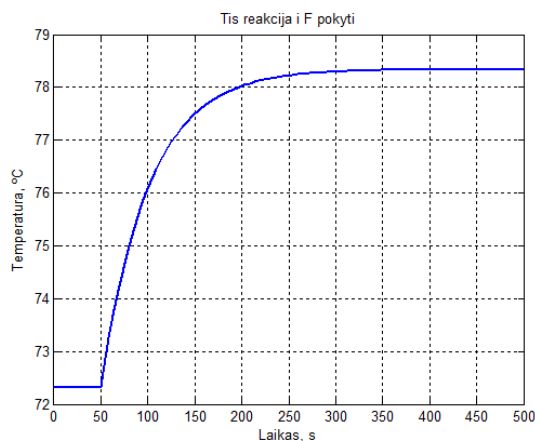
9 pav. Pakuros temperatūros reakcija į biokuro srauto pokytį



10 pav. Termofikacinio vandens ( $T_{is}$ ) temperatūros reakcija į biokuro srauto pokytį

### Termofikacinio vandens srautas

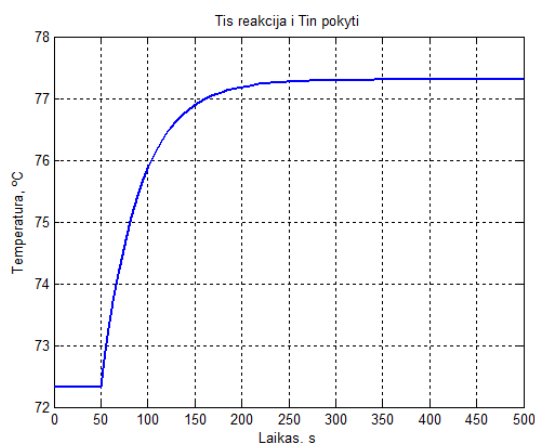
11 pav. pateikiama termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros  $T_{is}$  reakcija į termofikacinio vandens srauto pokytį  $F$ . Modelio įėjimas šuoliškai pakeičiamas 50 modeliavimo sekundę. Termofikacinio vandens srautas sumažėja iki  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ .



11 pav. Termofikacinio vandens ( $T_{i\bar{s}}$ ) temperatūros reakcija tūrinį srauto pokytį

### Termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto šilumos tinklų, temperatūra

12 pav. pateikiama termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros  $T_{i\bar{s}}$  reakcija į termofikacinio vandens, grįžtančio iš miesto šilumos tinklų, temperatūros pokytį  $T_{in}$ . Modelio įėjimas šuoliškai pakeičiamas 50 modeliavimo sekundę. Vandens temperatūros vertė padidėja iki 55 °C.



12 pav. Termofikacinio vandens ( $T_{i\bar{s}}$ ) temperatūros reakcija vandens, grįžtančio iš šilumos tinklų, temperatūros pokytį

## 2.3 Vienkontūrė valdymo sistema

Norint patikrinti sukurtos adaptyvios valdymo sistemos efektyvumą, naudingumą, taip pat buvo sukuriama vienkontūrė valdymo sistema. Atlikus bandymus su šia sistema ir apskaičiavus proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodiklius bus galima palyginti abiejų sukurtų sistemų veikimą.

### 2.3.1 Vienkontūrės valdymo sistemos modelio sudarymas

Atliekant vienkontūrės valdymo sistemos reguliavimą buvo laikoma, kad biokuro kaloringumas  $K$  yra lygus  $19 \times 10^6 J$ , termofikacinio vandens srautas  $F = 0,47 m^3/s$ . Apskaičiuojant PID reguliatoriaus parametrus bus naudojami tie patys modelio parametrai, kurie buvo nustatyti 7.2 skyriuje.

PID reguliatoriaus parametrai yra apskaičiuojami taikant ITAE derinimo 20, 21 ir 22 formules. Modeliuojant vienkontūrės valdymo sistemos reakciją į šuolinį nuostato pokytį buvo naudojama 8.2 skyriuje 25 pav. pateikta modelio schema.

$$K_r = \frac{0,965}{K_{pr}} \left( \frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,855} \quad (20)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{[0,796 - 0,147 \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)]} \quad (21)$$

$$T_d = 0,308 T_{pr} \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,929} \quad (22)$$

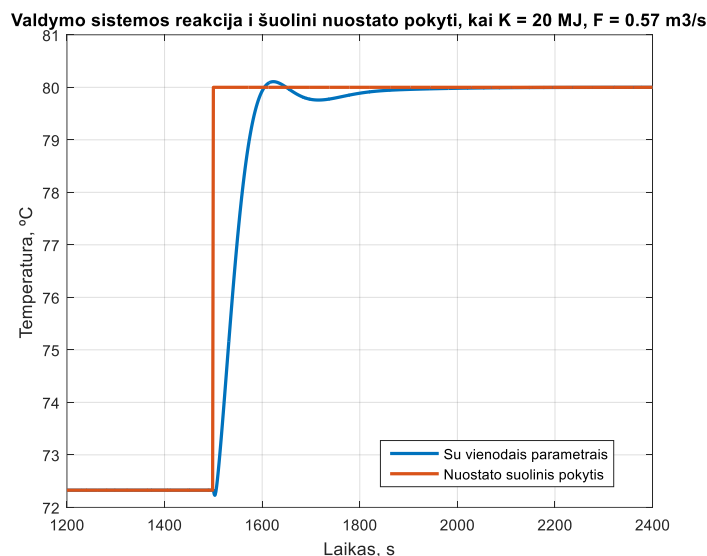
Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus 9 eksperimentą (eksperimento rezultatai 8.2 skyriuje). Modelio parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 7,667$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 82,2$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 29,6$ .

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_r = 0,301$ ;
- Integruojanti laiko pastovioji  $T_i = 110,623$ ;
- Diferencijuojanti laiko pastovioji  $T_d = 9,802$ .

Vienkontūrės valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato (termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros) pokytį pateikiama 13 pav.



**13 pav.** Sistemos reakcija į šuolinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 19 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 12 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai:

- Maksimalus leistinas santykinis dinaminis nuokrypis  $\sigma = 0,11$  (1,43 %);
- Leistina liekamoji nuokrypa (statinė paklaida)  $\Delta x = 0,384$  (5 %);
- Leistina reguliavimo trukmė  $t_r = 76,6 \text{ s}$ .

### 2.3.2 Vienkontūrės valdymo sistemos tyrimas

Sukurta vienkontūrė valdymo sistema buvo iširta atlikus kelis tyrimus, kurių metu buvo keičiamos biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertės. Pirmiausia eksperimentai buvo atlikti su PID reguliatoriaus parametrais, apskaičiuotais 7.1 skyriuje.

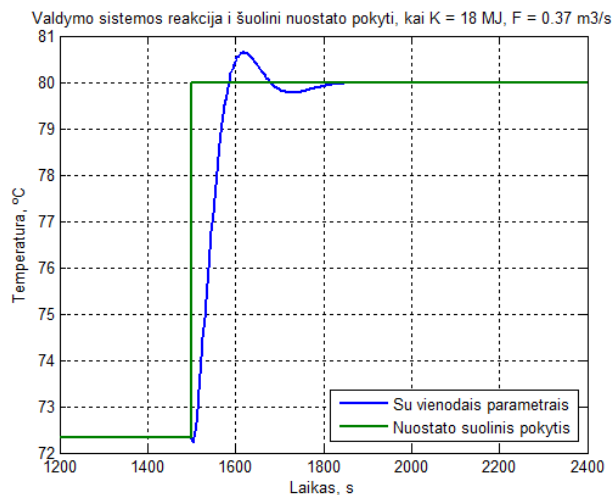
Atlikus bandymus taip pat buvo atlikti eksperimentai su perskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais. Eksperimentai buvo atlikti tuose pačiuose taškuose, t.y. su tomis pačiomis biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertėmis.

#### 2.3.2.1 Sistemos tyrimas naudojant vienodus reguliatoriaus parametrus

Iš viso buvo atlikti keturi bandymai, kurių metu buvo naudoti tie patys PID reguliatoriaus parametrai, kurie apskaičiuoti 7.1 skyriuje. Kiekvieno eksperimento metu buvo gauta sistemos reakcija į šuolinį trikdomąjį poveikį. Iš šios reakcijos buvo apskaičiuojami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodikliai.

## 1 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 18 \text{ MJ}$ . Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį pateikiama 14 pav.

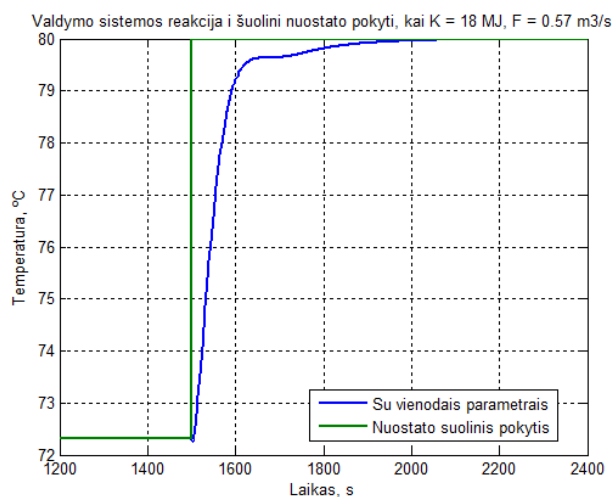


**14 pav.** Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 14 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 9 lentelėje.

## 2 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 18 \text{ MJ}$ . Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį pateikiama 15 pav.

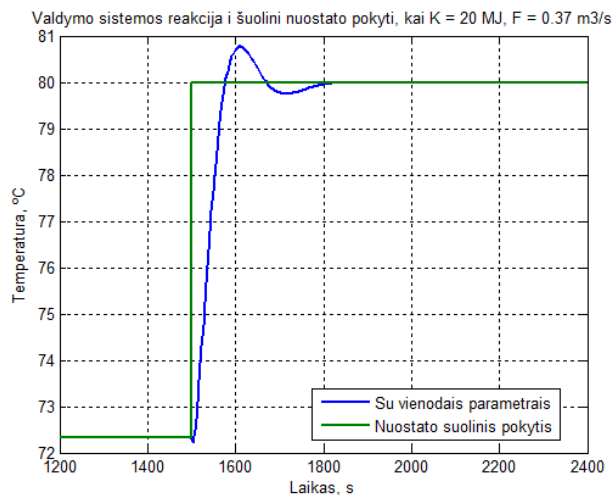


**15 pav.** Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 15 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 10 lentelėje.

### 3 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 20 \text{ MJ}$ . Valdymo sistemos reakcija į šuolinių nuostato pokytį pateikiama 16 pav.

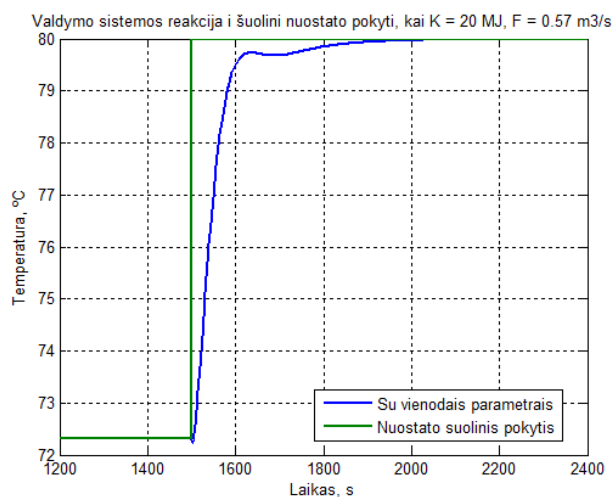


16 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinių nuostato pokytį, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 16 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 11 lentelėje.

### 4 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 20 \text{ MJ}$ . Valdymo sistemos reakcija į šuolinių nuostato pokytį pateikiama 17 pav.



17 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinių nuostato pokytį, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 17 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 12 lentelėje.



### 2.3.2.2 Sistemos tyrimas naudojant skirtingus reguliatoriaus parametrus

Norint patikrinti vienkontūrės valdymo sistemos patikimumą taip pat buvo atlikti bandymai su perskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais. Bandymai buvo atlikti su tomis pačiomis biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertėmis.

Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus eksperimentus (eksperimento rezultatai 8.2 skyriuje).

#### 1 eksperimentas

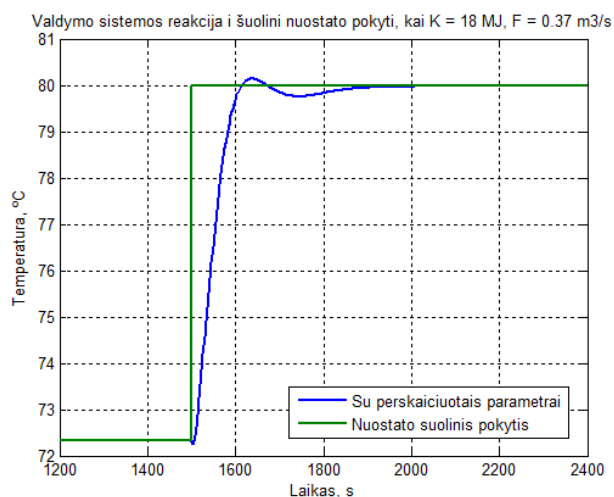
Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 18 \text{ MJ}$ . Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus 4 eksperimentą (eksperimento rezultatai 8.2 skyriuje). Modelio parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 9,167$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 90,45$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 32,95$ .

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_r = 0,25$ ;
- Integruojanti laiko pastovioji  $T_i = 121,827$ ;
- Diferencijuojanti laiko pastovioji  $T_d = 10,903$ .

Vienkontūrės valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato (termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros) pokytį pateikiama 18 pav.



18 pav. Sistemos reakcija į šuolinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 18 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 9 lentelėje.

## 2 eksperimentas

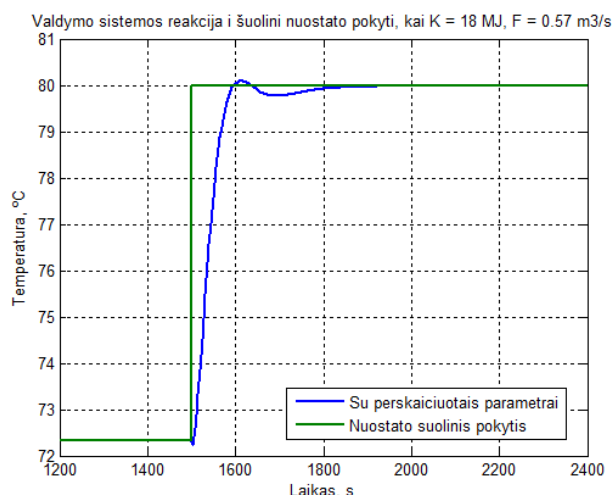
Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 18 \text{ MJ}$ . Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus 3 eksperimentą (eksperimento rezultatai 8.2 skyriuje). Modelio parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 6$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 76,8$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 26,9$ .

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_r = 0,394$ ;
- Integruojanti laiko pastovioji  $T_i = 103,155$ ;
- Diferencijuojanti laiko pastovioji  $T_d = 8,926$ .

Vienkontūrės valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato (termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros) pokytį pateikiama 19 pav.



19 pav. Sistemos reakcija į šuolinį trikdymą, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 19 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 10 lentelėje.

## 3 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K = 20 \text{ MJ}$ . Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus 2 eksperimentą (eksperimento rezultatai 8.2 skyriuje). Modelio parametrai:

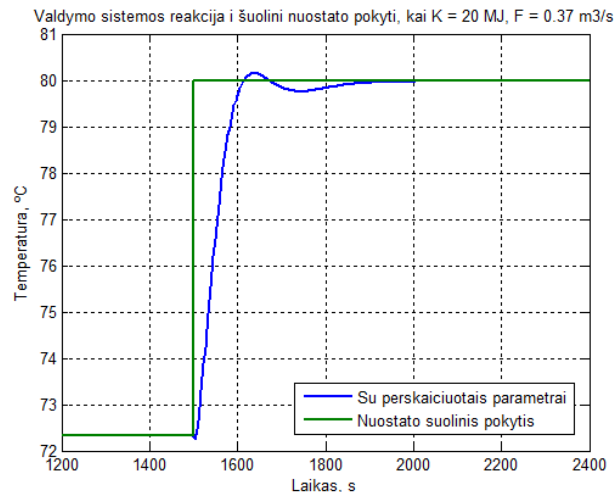
- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 10,2$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 90,45$ ;

- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 32,85$ .

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_r = 0,225$ ;
- Integruojanti laiko pastovioji  $T_i = 121,8$ ;
- Diferencijuojanti laiko pastovioji  $T_d = 10,872$ .

Vienkontūrės valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato (termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros) pokytį pateikiama 20 pav.



**20 pav.** Sistemos reakcija į šuolinį trikdymą poveikį, kai  $K = 20 MJ$ ,  $F = 0,37 m^3/s$

Remiantis 20 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 11 lentelėje.

#### 4 eksperimentas

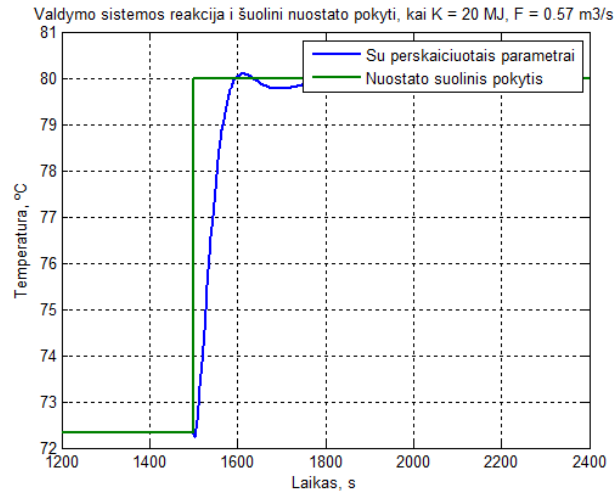
Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F = 0,57 m^3/s$ , o biokuro kaloringumas  $K = 20 MJ$ . Atsižvelgus į biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertes buvo naudojami modelio parametrai, kurie gauti atlikus 1 eksperimentą (eksperimento rezultatai 782 skyriuje). Modelio parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 6,667$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 76,8$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 26,9$ .

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai:

- Stiprinimo koeficientas  $K_r = 0,355$ ;
- Integruojanti laiko pastovioji  $T_i = 103,155$ ;
- Diferencijuojanti laiko pastovioji  $T_d = 8,926$ .

Vienkontūrės valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato (termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūros) pokytį pateikiama 21 pav.

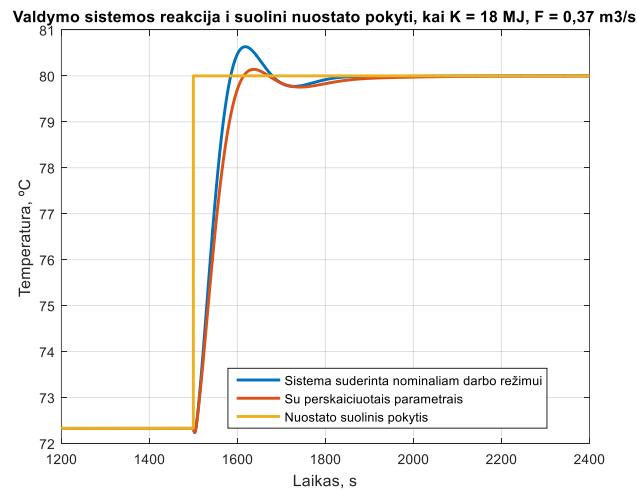


**21 pav.** Sistemos reakcija į šuolinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

Remiantis 21 pav. randami technologinio proceso valdomojo parametro pereinamojo proceso rodikliai. Kokybės rodikliai yra pateikiami 12 lentelėje.

### 2.3.3 Reguliavimo kokybės palyginimas

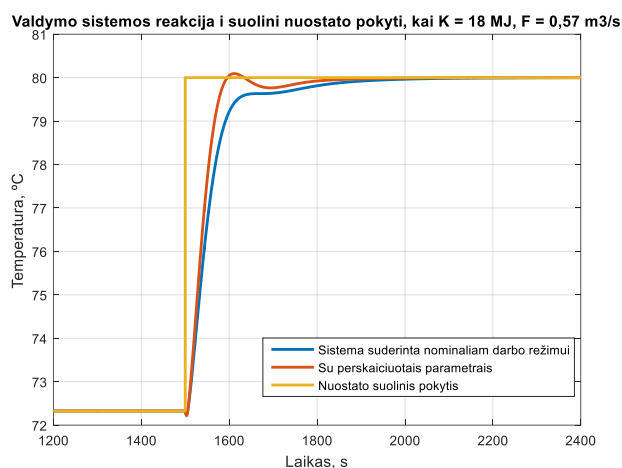
Atlikus vienkontūrės valdymo sistemos tyrimą su vienodais ir perskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais buvo palyginami gauti rezultatai. 22 – 25 pav. pateikiamos reakcijos kreivės, o 9 – 12 lentelėse pateikiami šių reakcijų kreivių kokybės rodikliai.



**22 pav.** Sistemos reakcija į šuolinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

**9 lentelė.** Valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodikliai, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

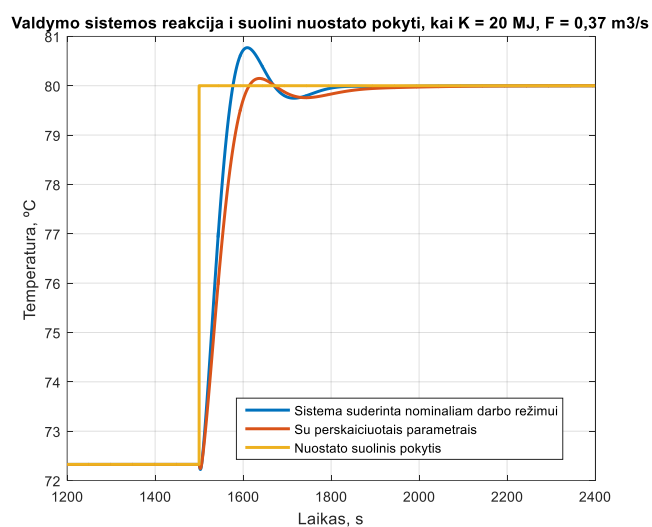
Kokybės rodiklis	Naudojant vienodus parametrus	Naudojant perskaičiuotus parametrus
Perreguliavimas $\sigma$ , %	10,82	1,825
Reguliavimo trukmė, s	148,1	97,1



**23 pav.** Sistemos reakcija į šulinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

**10 lentelė.** Valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodikliai, kai  $K = 18 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

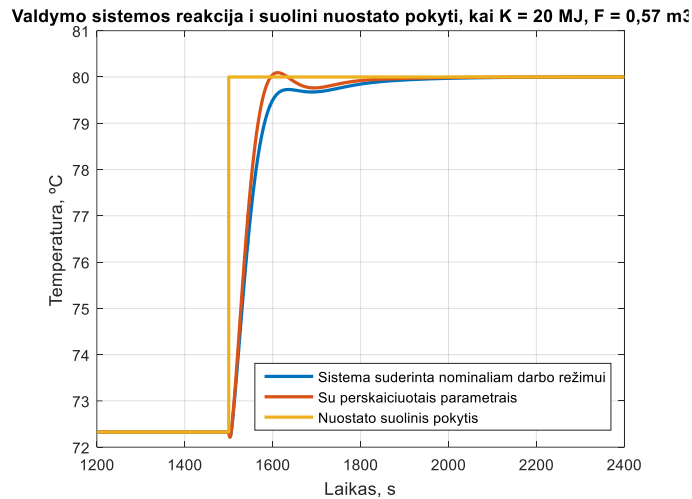
Kokybės rodiklis	Naudojant vienodus parametrus	Naudojant perskaiciuotus parametrus
Perreguliavimas $\sigma$ , %	0	1,213
Reguliavimo trukmė, s	142,4	79,5



**24 pav.** Sistemos reakcija į šulinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

**11 lentelė.** Valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodikliai, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

Kokybės rodiklis	Naudojant vienodus parametrus	Naudojant perskaiciuotus parametrus
Perreguliavimas $\sigma$ , %	10,04	1,96
Reguliavimo trukmė, s	144,1	96,8



**25 pav.** Sistemos reakcija į šulinį trikdomąjį poveikį, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

**12 lentelė.** Valdomojo parametro pereinamojo proceso kokybės rodikliai, kai  $K = 20 \text{ MJ}$ ,  $F = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$

Kokybės rodiklis	Naudojant vienodus parametrus	Naudojant perskaiciuotus parametrus
Perreguliavimas $\sigma$ , %	0	1,17
Reguliavimo trukmė, s	108,5	79,5

Palyginus gautus rezultatus galima padaryti išvadą, kad efektyviau būtų naudoti adaptyvią valdymo sistemą, kuri perskaičiuoja regulatoriaus parametrus atsižvelgiant į įtakojančias, šiuo atveju biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto, vertes.

### 3. ADAPTYVIOS VALDYMO SISTEMOS SUDARYMAS IR TYRIMAS

Adaptyvios valdymo sistemos kūrimą galima suskirstyti į kelis etapus, kurie bus aprašomi šiame skyriuje. Pirmiausia yra sudaromas tiriamo objekto eksperimentinio tyrimo planas ir atliekami eksperimentai. Remiantis šių eksperimentų rezultatais sudaromi stiprinimo koeficiento, laiko ir vėlavimo pastoviųjų polinomieniai modeliai.

Atlikus visus skaičiavimus, sudarius proceso parametrų polinominius modelius, sukuriama adaptyvios valdymo sistemos modelis naudojant Matlab/Simulink programinę aplinką. Paskutiniame etape yra atliekamas šios sistemos tyrimas, patikrinama kaip sistema veiks su skirtingomis biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto vertėmis, kaip reaguos į biokuro srauto trikdomąjį poveikį.

### 3.1 Technologinio proceso eksperimentinis tyrimas

Modelio parametrų identifikavimui naudojamas ortogonalus kompozicinis planas. Faktoriai ir jų keitimo lygiai, naudojant kompozicinį planą, pateikti 13 lentelėje:

**13 lentelė.** Kompozicinio plano faktoriai ir jų keitimo ribos

Faktoriai	PFE lygiai		Plano centras
	$X_i = -1$	$X_i = +1$	$X_i = 0$
F	0,37	0,57	0,47
K	$18 \times 10^6$	$20 \times 10^6$	$19 \times 10^6$

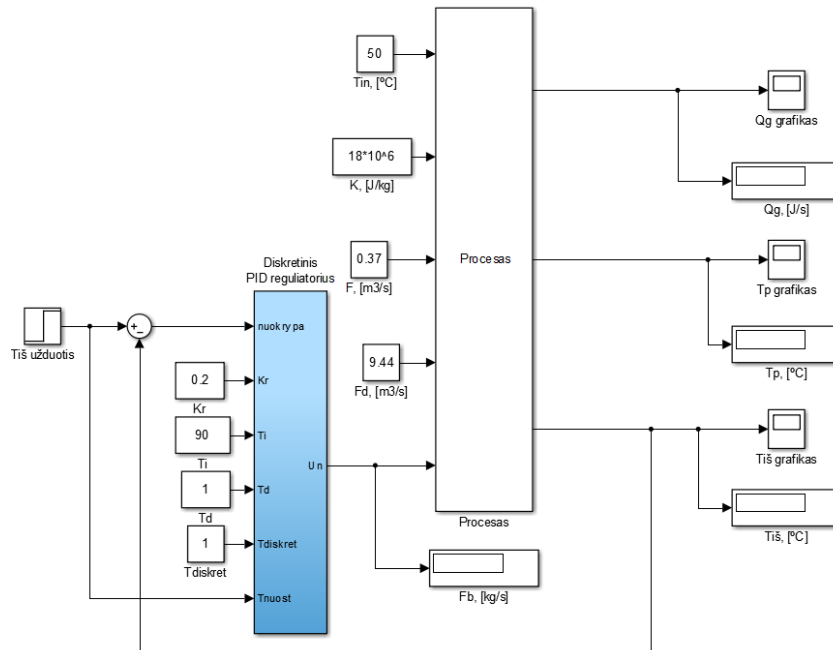
Ortogonalus kompozicinis eksperimentų planas ir atitinkami eksperimentų rezultatai pateikti 14 lentelėje:

**14 lentelė.** Ortogonalus kompozicinis planas ir eksperimentų rezultatai

Eksp. Nr.	Eksp. Plano matrica		Eksp. rezultatai	Eksp. rezultatai	Eksp. rezultatai
	$F$	$K$	$K_{pr}$	$T_{pr}$	$\tau_{pr}$
1	+1	+1	6,667	76,8	26,9
2	-1	+1	10,2	90,45	32,85
3	+1	-1	6	76,8	26,9
4	-1	-1	9,167	90,45	32,95
5	+1	0	6,333	76,65	27,05
6	-1	0	9,7	90,75	32,85
7	0	+1	8,033	81,75	29,75
8	0	-1	7,233	81,75	29,75
9	0	0	7,667	82,2	29,6

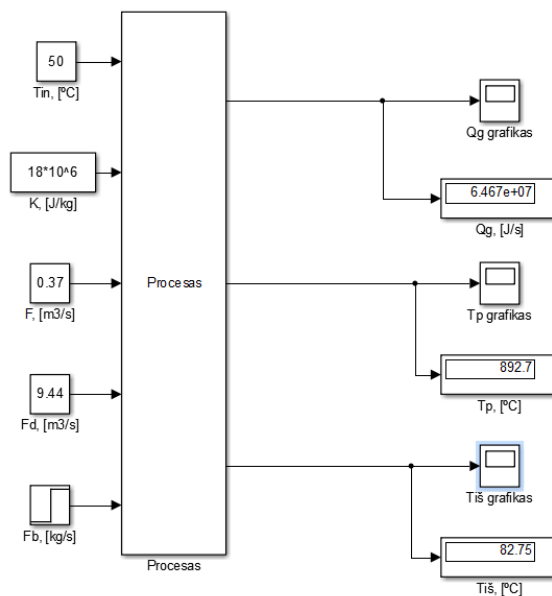
Atliekant eksperimentus pirmausia buvo nustatomas biokuro srautas  $F_b$  su pastoviomis termofikacinio vandens, tekančio per vandens šildymo katilą, srauto ir biokuro kaloringumo vertėmis. Biokuro srautas buvo nustatomas naudojant modelio schemą, kuri pateikta 26 pav.

Modeliavimo metu buvo keičiamas termofikacinio vandens, grįžtančio į miesto šilumos tinklą, temperatūros nuostatas (nuo  $72.3 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



26 pav. Modelio schema, skirta biokuro srautui nustatyti eksperimentų metu

Nustačius biokuro srautą, su kurio pasiekama užduota termofikacinio vandens, tiekiamo į miesto šilumos tinklus, temperatūra ( $T_{is} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), toliau buvo atliekamas proceso modeliavimas. Modelio schema pateikiama 27 pav.



27 pav. Modelio schema, skirta pirmosios eilės su vėlavimu modelio parametrų nustatymui iš šulinės reakcijos kreivės

Modeliavimo metu buvo pakeičiama biokuro srauto vertė, t.y. dydis  $F_b$ , kurio radimo metodika buvo aprašyta ankščiau, 100 modeliavimo sekundę padidinamas 0,3 kg/s. Gavus reakcijos kreivę buvo atliekamas pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos identifikavimas, apskaičiuojamas stiprinimo koeficientas  $K_{pr}$  (23 lygtis), laiko pastovioji  $T_{pr}$



(24 lygtis) ir vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr}$  (25 lygtis). Proceso modelio parametrų nustatymui buvo naudotas Smith'o metodas.

Stiprinimo koeficientas  $K_{pr}$  apskaičiuojama pagal 20 lygtį:

$$K_{pr} = \frac{y^{(\infty)}}{\Delta u} \quad (23)$$

Laiko pastovioji  $T_{pr}$  apskaičiuojama pagal 21 lygtį:

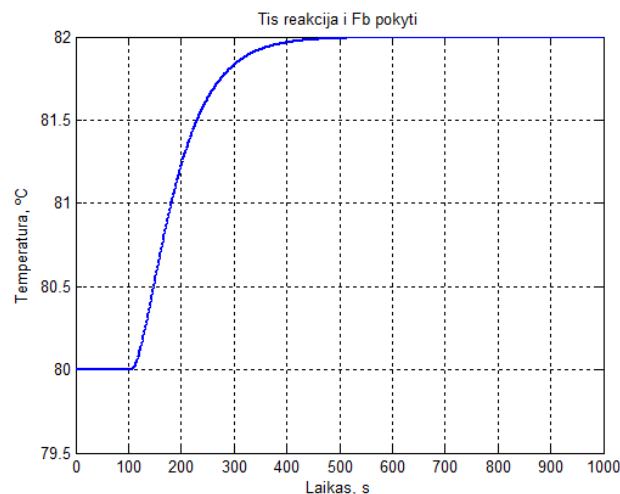
$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (24)$$

Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr}$  apskaičiuojama pagal 22 lygtį:

$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr} \quad (25)$$

## 1 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{max} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{max} = 20 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 4,545 \text{ kg/s}$ . 28 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



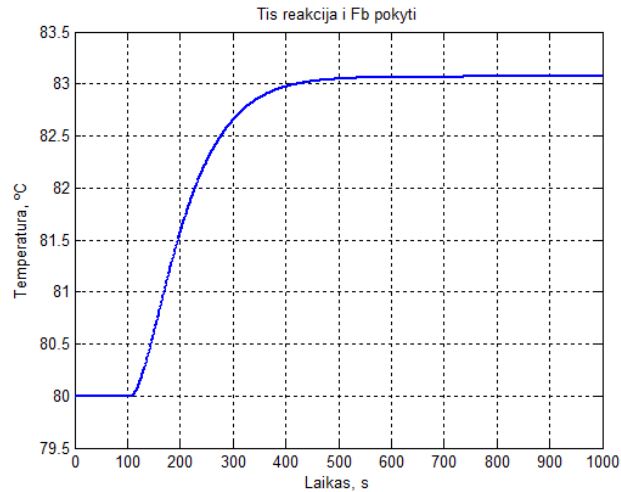
28 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 1 – ajį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametrų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametrų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 6,667$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 76,8$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 26,9$ .

## 2 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{min} = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{max} = 20 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 2,964 \text{ kg/s}$ . 29 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



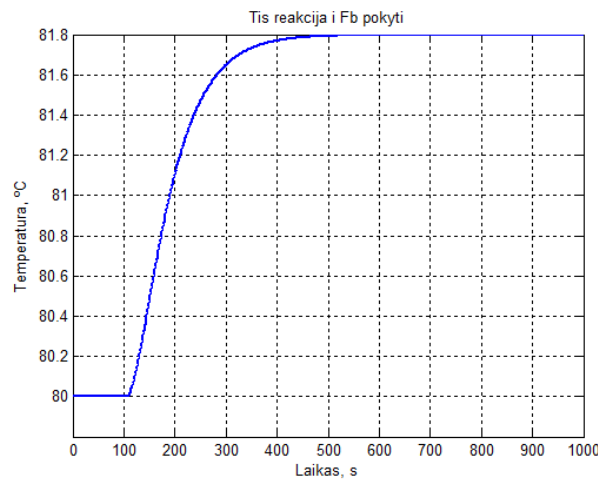
29 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 2 – ąjį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustatčius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 10,2$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 90,45$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 32,85$ .

### 3 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{max} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{min} = 18 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 5,05 \text{ kg/s}$ . 30 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



30 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 3 – ąjį eksperimentą

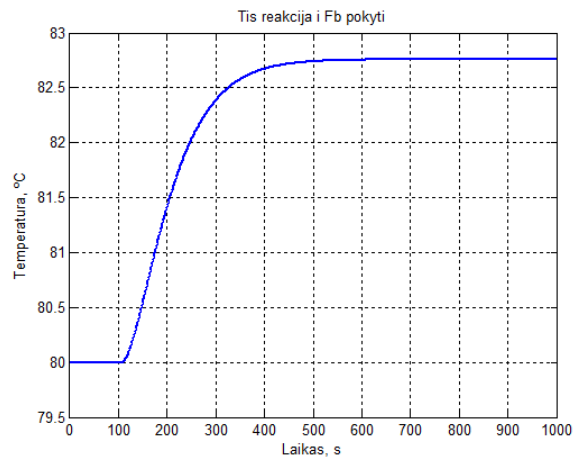
Iš reakcijos kreivės nustatčius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 6$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 76,8$ ;

- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 26,9$ .

#### 4 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{min} = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{min} = 18 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 3,293 \text{ kg/s}$ . 31 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



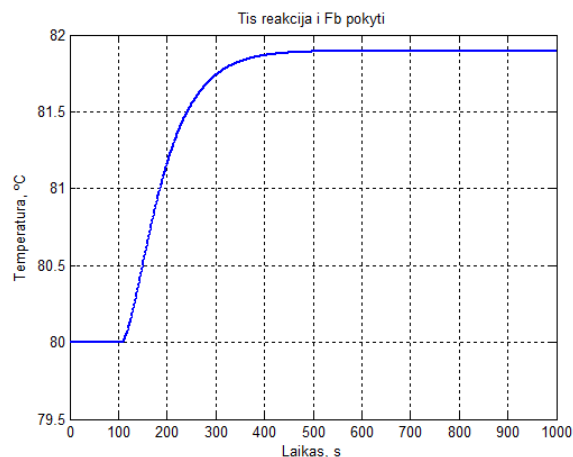
31 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 4 – ajį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 9,167$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 90,45$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 32,95$ .

#### 5 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{max} = 0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{vid} = 19 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 4,784 \text{ kg/s}$ . 32 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



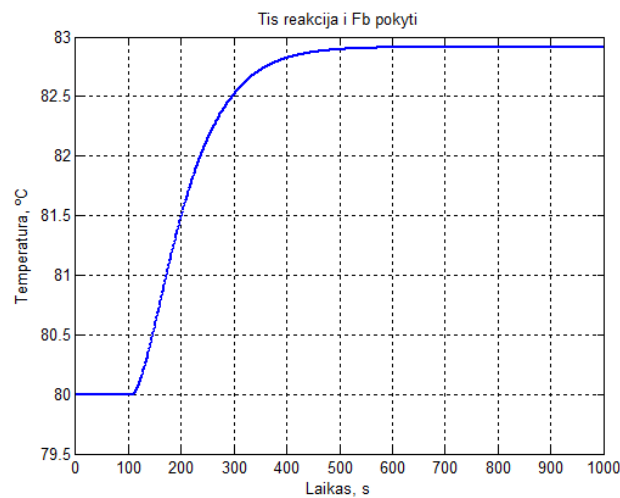
32 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 5 – ajį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 6,333$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 76,65$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 27,05$ .

### 6 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{min} = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{vid} = 19 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 3,12 \text{ kg/s}$ . 33 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



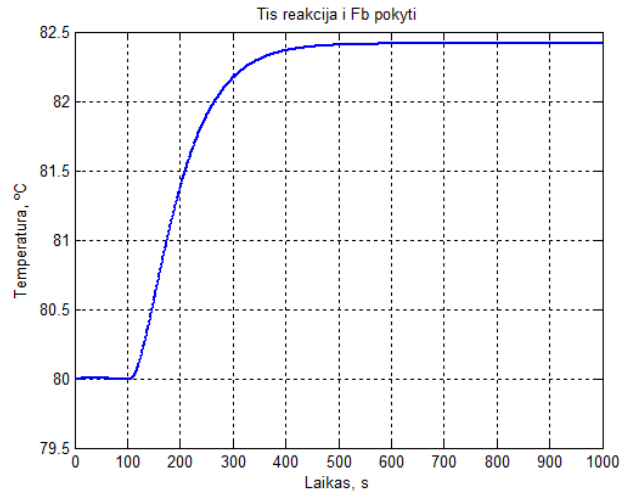
33 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 6 – ajį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 9,7$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 90,75$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 32,85$ .

### 7 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{vid} = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{max} = 20 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 3,754 \text{ kg/s}$ . 34 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



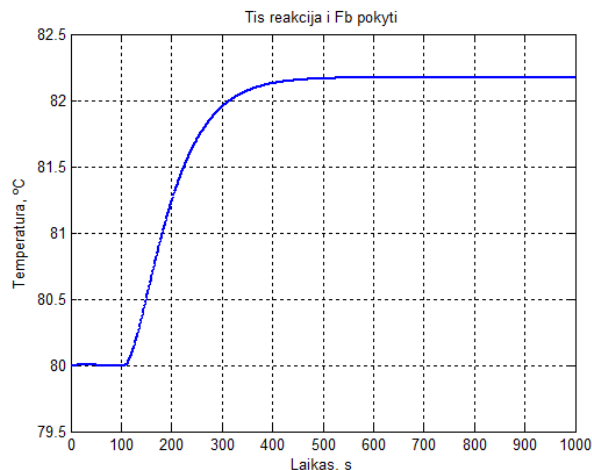
**34 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 7 – ajį eksperimentą**

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 8,033$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 81,75$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 29,75$ .

### 8 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{vid} = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{min} = 18 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 4,171 \text{ kg/s}$ . 35 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



**35 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 8 – ajį eksperimentą**

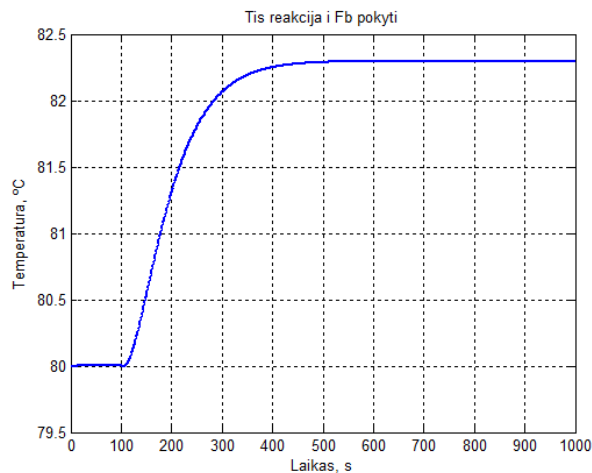
Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 7,233$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 81,75$ ;

- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 29,75$ .

### 9 eksperimentas

Atliekant eksperimentą buvo laikoma, kad termofikacinio vandens srautas  $F_{vid} = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ , o biokuro kaloringumas  $K_{vid} = 19 \text{ MJ}$ , nustatyta biokuro vertė  $F_b = 3,952 \text{ kg/s}$ . 36 pav. pateikiama reakcijos kreivė, iš kurios bus nustatomi modelio parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ .



36 pav. Reakcijos kreivė, gauta atliekant 9 – ajį eksperimentą

Iš reakcijos kreivės nustačius  $t_1$  ir  $t_2$  bei atlikus parametų skaičiavimus buvo gautos šios modelio parametų vertės:

- Stiprinimo koeficientas  $K_{pr} = 7,667$ ;
- Laiko pastovioji  $T_{pr} = 82,2$ ;
- Vėlavimo pastovioji  $\tau_{pr} = 29,6$ .

Naudojant atliktų eksperimentų rezultatus (t.y. stiprinimo koeficiento, laiko pastoviosios ir vėlavimo pastoviosios) toliau buvo sudaromi statistiniai modeliai. Modelio parametrai bus apskaičiuojami taikant mažiausių kvadratų metodą (MKM).

## 3.2 Polinomių modelių sudarymas

Ekstreminio tipo priklausomybei aprašyti parenkamas tokios struktūros antros eilės polinominis modelis:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 K + \alpha_2 F + \alpha_{11} K^2 + \alpha_{22} F^2 + \alpha_{12} KF$$

Kadangi eksperimentai buvo atliekami pagal kompozicinį planą, tai šio plano branduolys yra PFE planas  $2^n$ , planų parametrai yra tokie:

$$n = 2, N = 9, \alpha = 1, \beta = 0.6667.$$

Apskaičiuojami dispersinės matricos  $C = M^{-1}$  elementai:

$$m_0 = 2^{n-p} + 2n + 1 = 2^2 + 2 \times 2 + 1 = 9$$

$$m_1 = 2^{n-p} + 2\alpha^2 = 2^2 + 2 \times 1^2 = 6$$

$$m_2 = 2^{n-p}(1 - \beta)^2 + 2(\alpha^2 - \beta)^2 + (2n - 1)\beta^2 \\ = 2^2 \times (1 - 0.6667)^2 + (1^2 - 0.6667)^2 + (2 \times 2 - 1) \times 0.6667^2 = 1.89$$

$$m_3 = 2^{n-p} = 2^2 = 4$$

$$c_0 = m_0^{-1} = 0.11$$

$$c_1 = m_1^{-1} = 0.17$$

$$c_2 = m_2^{-1} = 0.53$$

$$c_3 = m_3^{-1} = 0.25$$

Apskaičiuoti dispersinės matricos elementai bus naudojami stiprinimo koeficiento, laiko ir vėlavimo pastoviuųjų polinominių modelių parametų skaičiavimuose.

### 3.2.1 Stiprinimo koeficiento polinominio modelio sudarymas

Polinominio modelio parametų apskaičiavimas:

$$a_1 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i = 0,17 \times (1 \times 6,67 + (-1) \times 10,2 + \dots + 0 \times 7,67) = -1,71$$

$$a_2 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{2i} y_i = 0,17 \times (1 \times 6,67 + 1 \times 10,2 + \dots + 0 \times 7,67) = 0,43$$

$$a_{11} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{1i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 6,67 + \dots + (0 - 0,6667) \times 7,67] \\ = 0,39$$

$$a_{22} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{2i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 6,67 + \dots + (0 - 0,6667) \times 7,67] = -0,02$$

$$a_{12} = c_3 \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i} y_i = 0,25 \times [1 \times 1 \times 6,67 + 1 \times (-1) \times 10,2 + \dots + 0 \times 0 \times 7,67] = -0,09$$

$$a_0 = a_0^* - \beta \sum_{l=1}^n a_{n+1} = 7,889 - 0,6667 \times (0,39 + (-0,02)) = 7,89$$

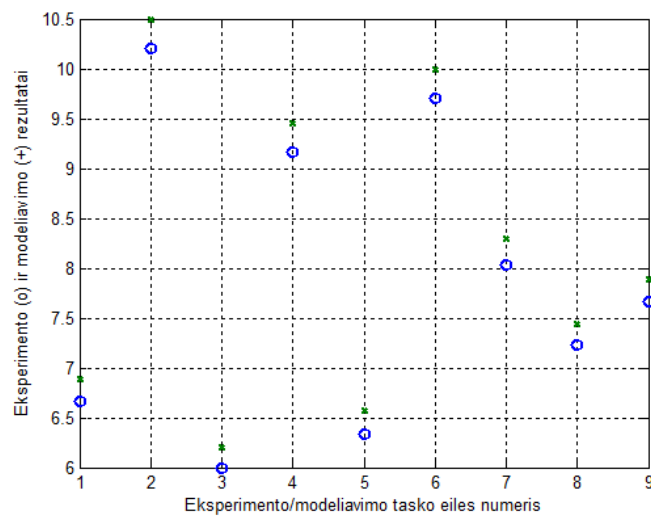
Apskaičiavus parametrus, gautas toks polinominis modelis:

$$y_{K_{pr}} = 7,89 - 1,71F + 0,43K + 0,39F^2 - 0,02K^2 - 0,09FK$$

Sudarius stiprinimo koeficiento polinominį modelį buvo atliktas modeliavimas ir rezultatai palyginami su eksperimentiniais. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai palyginami 15 lentelėje ir grafiškai (37 pav.):

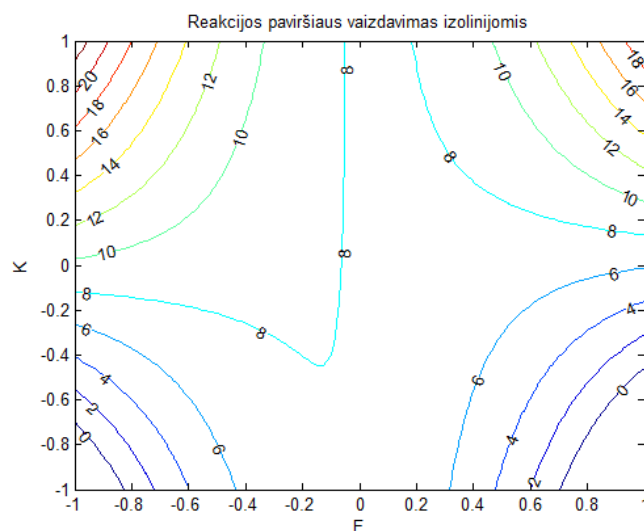
**15 lentelė.** Eksperimento ir modeliavimo duomenų palyginimas

Eksp. Nr.	Faktorių vertės		Eksperimento rezultatai	Modeliavimo rezultatai
	$X_1$	$X_2$		
1	+1	+1	6,667	6,89
2	-1	+1	10,2	10,49
3	+1	-1	6	6,21
4	-1	-1	9,167	9,45
5	+1	0	6,333	6,57
6	-1	0	9,7	9,99
7	0	+1	8,033	8,3
8	0	-1	7,233	7,44
9	0	0	7,667	7,89



**37 pav.** Eksperimento ir modeliavimo rezultatų palyginimas

Modeliuojamas reakcijos paviršius ekstremumo taško (maksimumo) aplinkoje grafiškai atvaizduojamas 38 pav.



**38 pav.** Reakcijos paviršiaus vaizdavimas izolinijomis



Palyginus eksperimento ir modeliavimo rezultatus galima pastebėti, kad šios vertės yra labai panašios. Tai reiškia, kad stiprinimo koeficiento polinominis modelis yra sudarytas teisingai ir jį galima naudoti kuriant adaptyvią valdymo sistemą.

### 3.2.2 Laiko pastoviosios polinominio modelio sudarymas

Polinominio modelio parametrų apskaičiavimas:

$$a_1 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i = 0,17 \times (1 \times 76,8 + (-1) \times 90,45 + \dots + 0 \times 82,2) = -7,04$$

$$a_2 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{2i} y_i = 0,17 \times (1 \times 76,8 + 1 \times 90,45 + \dots + 0 \times 82,2) = 0$$

$$a_{11} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{1i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 76,8 + \dots + (0 - 0,6667) \times 82,2] = 1,84$$

$$a_{22} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{2i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 76,8 + \dots + (0 - 0,6667) \times 82,2] = -0,23$$

$$a_{12} = c_3 \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i} y_i = 0,25 \times [1 \times 1 \times 76,8 + 1 \times (-1) \times 90,45 + \dots + 0 \times 0 \times 82,2] = 0$$

$$a_0 = a_0^* - \beta \sum_{l=1}^n a_{n+1} = 83,067 - 0,6667 \times (1,84 + (-0,23)) = 83,34$$

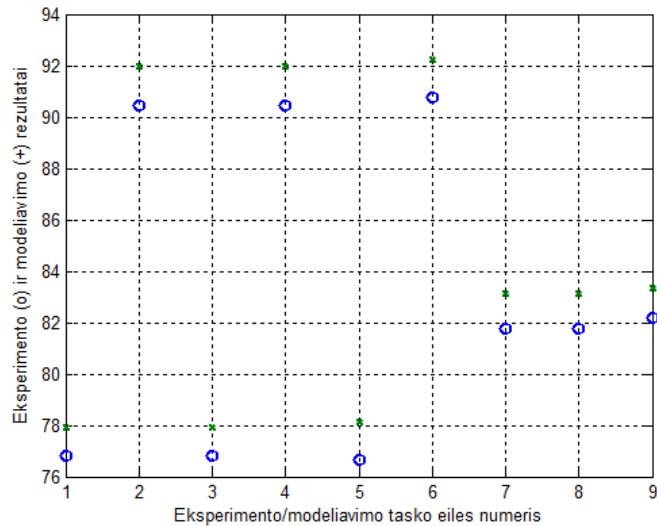
Apskaičiavus parametrus, gautas toks polinominis modelis:

$$y_{Tpr} = 83,34 - 7,04F + 1,84F^2 - 0,23K^2$$

Sudarius laiko pastoviosios polinominį modelį buvo atliktas modeliavimas ir rezultatai palyginami su eksperimentiniais. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai palyginami 16 lentelėje ir grafiškai (39 pav.):

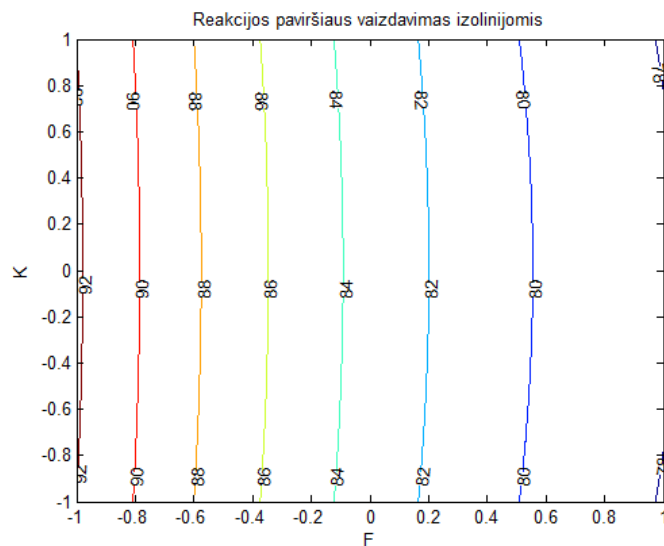
**16 lentelė.** Eksperimento ir modeliavimo duomenų palyginimas

Eksp. Nr.	Faktorių vertės		Eksperimento rezultatai	Modeliavimo rezultatai
	$X_1$	$X_2$		
1	+1	+1	76,8	77,91
2	-1	+1	90,45	91,99
3	+1	-1	76,8	77,91
4	-1	-1	90,45	91,99
5	+1	0	76,65	78,14
6	-1	0	90,75	92,22
7	0	+1	81,75	83,11
8	0	-1	81,75	83,11
9	0	0	82,2	83,34



39 pav. Eksperimento ir modeliavimo rezultatų palyginimas

Modeliuojamas reakcijos paviršius ekstremumo taško (maksimumo) aplinkoje grafiškai atvaizduojamas 40 pav.



40 pav. Reakcijos paviršaus vaizdavimas izolinijomis

Palyginus eksperimento ir modeliavimo rezultatus galima pastebėti, kad šios vertės yra labai panašios. Tai reiškia, kad laiko pastoviosios polinominis modelis yra sudarytas teisingas ir jį galima naudoti kuriant adaptyvią valdymo sistemą.

### 3.2.3 Vėlavimo pastoviosios polinominio modelio sudarymas

Polinominio modelio parametų apskaičiavimas:

$$a_1 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i = 0,17 \times (1 \times 26,9 + (-1) \times 32,85 + \dots + 0 \times 29,6) = -3,03$$

$$a_2 = c_1 \sum_{i=1}^N x_{2i} y_i = 0,17 \times (1 \times 26,9 + 1 \times 32,85 + \dots + 0 \times 29,6) = -0,02$$

$$a_{11} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{1i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 26,9 + \dots + (0 - 0,6667) \times 29,6] = 0,22$$

$$a_{22} = c_2 \sum_{i=1}^N (x_{2i}^2 - \beta) y_i = 0,53 \times [(1 - 0,6667) \times 6,67 + \dots + (0 - 0,6667) \times 29,6] = 0,01$$

$$a_{12} = c_3 \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i} y_i = 0,25 \times [1 \times 1 \times 26,9 + 1 \times (-1) \times 32,85 + \dots + 0 \times 0 \times 29,6] = 0,03$$

$$a_0 = a_0^* - \beta \sum_{i=1}^n a_{n+1} = 29,844 - 0,6667 \times (0,22 + 0,01) = 29,84$$

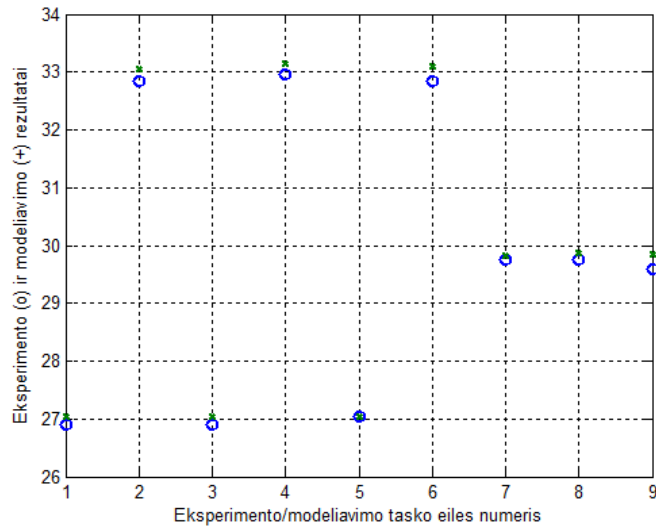
Apskaičiavus parametrus, gautas toks polinominis modelis:

$$y_{\tau_{pr}} = 29,84 - 3,03F - 0,02K + 0,22F^2 + 0,01K^2 + 0,03FK$$

Sudarius vėlavimo pastoviosios polinominį modelį buvo atliktas modeliavimas ir rezultatai palyginami su eksperimentiniais. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai palyginami 17 lentelėje ir grafiškai (41 pav.):

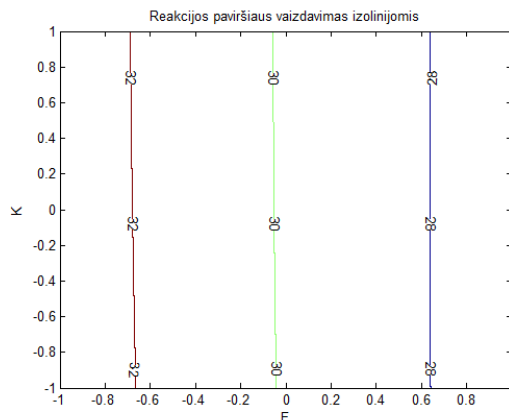
**17 lentelė.** Eksperimento ir modeliavimo duomenų palyginimas

Eksp. Nr.	Faktorių vertės		Eksperimento rezultatai	Modeliavimo rezultatai
	$X_1$	$X_2$		
1	+1	+1	26,9	27,05
2	-1	+1	32,85	33,05
3	+1	-1	26,9	27,03
4	-1	-1	32,95	33,15
5	+1	0	27,05	27,03
6	-1	0	32,85	33,09
7	0	+1	29,75	29,83
8	0	-1	29,75	29,87
9	0	0	29,6	29,84



41 pav. Eksperimento ir modeliavimo rezultatų palyginimas

Modeliuojamas reakcijos paviršius ekstremumo taško (maksimumo) aplinkoje grafiškai atvaizduojamas 42 pav.

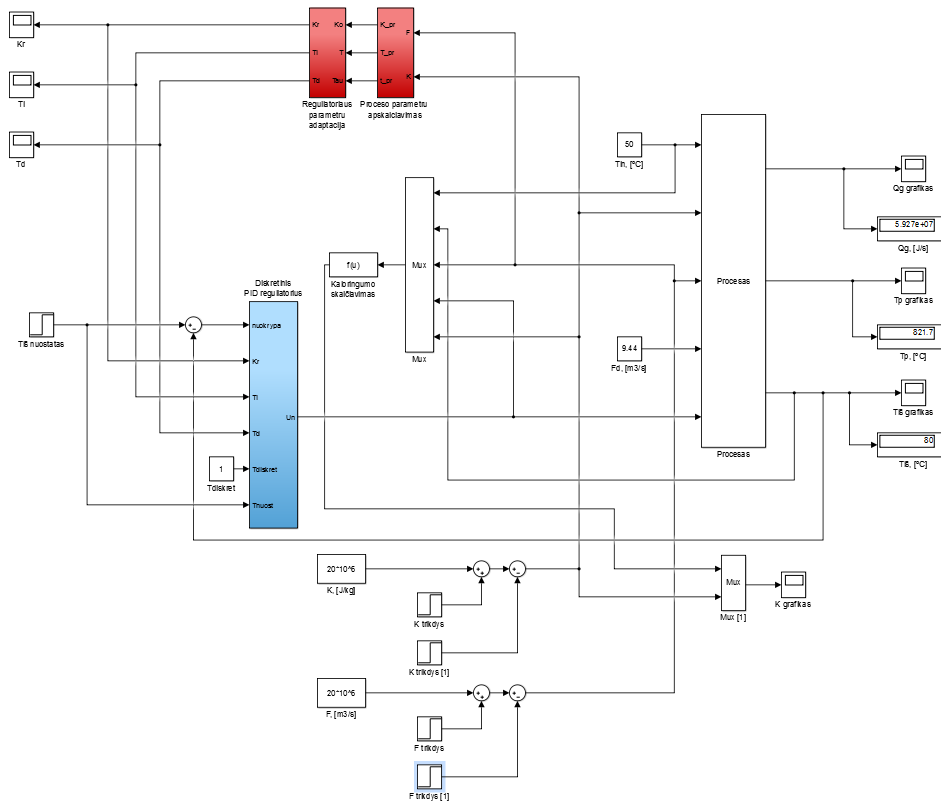


42 pav. Reakcijos paviršiaus vaizdavimas izolinijomis

Palyginus eksperimento ir modeliavimo rezultatus galima pastebėti, kad šios vertės yra labai panašios. Tai reiškia, kad vėlavimo pastoviosios polinominis modelis yra sudarytas teisingai ir jį galima naudoti kuriant adaptyvią valdymo sistemą.

### 3.3 Adaptyvios valdymo sistemos modelio sudarymas

Adaptyvios valdymo sistemos modelis pateikiamas 43 pav. Sukurtoje sistemoje regulatoriaus parametrais yra perskaičiuojami įvertinus termofikacinio vandens, pratekančio per vandens šildymo katilą, srautą ir biokuro kaloringumą, kuris yra įvertinamas netiesiogiai.



43 pav. Adaptyvios valdymo sistemos modelis

„Kaloringumo skaičiavimas“ bloke yra netiesiogiai įvertinamas biokuro kaloringumas, „Proceso parametru apskaičiavimas“ – remiantis 7.2 skyriuje sudarytais polinominiais modeliais apskaičiuojami proceso parametrai  $K_{pr}$ ,  $T_{pr}$  ir  $\tau_{pr}$ , „Regulatoriaus parametru adaptacija“ – naudojant ITAE regulatoriaus derinimo taisyklės apskaičiuojami PID regulatoriaus parametrai.

Biokuro kaloringumas yra įvertinamas pagal 26 lygtį:

$$K = \frac{kF(T_{i\check{s}} - T_{in})}{F_b} \quad (26)$$

čia  $K$  – biokuro kaloringumas,  $J/kg$ ,  $k$  – stiprinimo koeficientas,  $F$  – termofikacinio vandens, pratekančio per vandens šildymo katilą, srautas,  $m^3/s$ ,  $T_{i\check{s}}$  ir  $T_{in}$  – į sistemą įeinančio ir išeinančio termofikacinio vandens temperatūra,  $^{\circ}C$ ,  $F_b$  – biokuro srautas,  $kg/s$ .

Stiprinimo koeficientas yra apskaičiuojamas pagal 27 lygtį:

$$k = \frac{F_b K}{F(T_{i\check{s}} - T_{in})} \quad (27)$$

Sudarytose polinominio modelio lygtyse ribinės (maksimali ir minimali) faktorių vertės pažymėtos atitinkamai +1 ir -1. Šios ribos atitinka normuotą (standartizuotą) faktorių kitimo mastelį. Pereiti nuo natūralios prie normuotos faktorių mastelio galima panaudojus 28 lygtį:

$$x_j = \frac{x_j^* \frac{x_{jmax}^* + x_{jmin}^*}{2}}{\frac{x_{jmax}^* - x_{jmin}^*}{2}} \quad (28)$$

čia  $x_j^*$  - j – ojo faktoriaus vertė absoliučiaisiais vienetais,  $x_{jmax}^*$  ir  $x_{jmin}^*$  - maksimali ir minimali vertė absoliučiaisiais vienetais.

PID regulatoriaus parametrai yra apskaičiuojami naudojant ITAE (minimali integruota absoliučioji paklaida su laiko svoriniu koeficientu) derinimo formules trikdančiajam reakcijos tipui. Stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal 29 , integruojanti laiko pastovioji pagal 30, o diferencijuojanti laiko pastovioji pagal 31 formules.

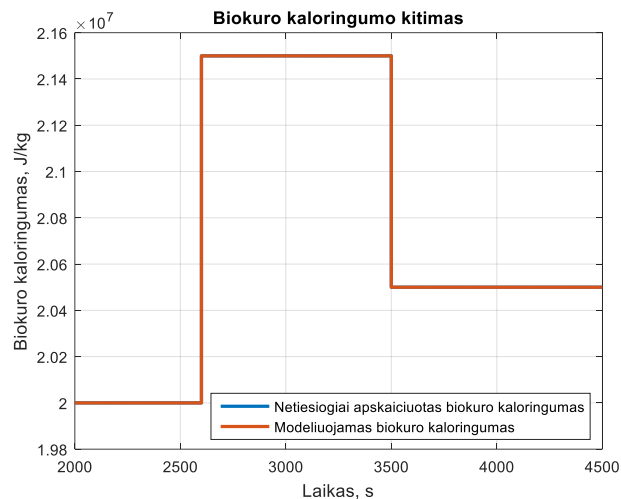
$$K_r = \frac{1,357}{K_{pr}} \left( \frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947} \quad (29)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,842} \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738} \quad (30)$$

$$T_d = 0,381 T_{pr} \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995} \quad (31)$$

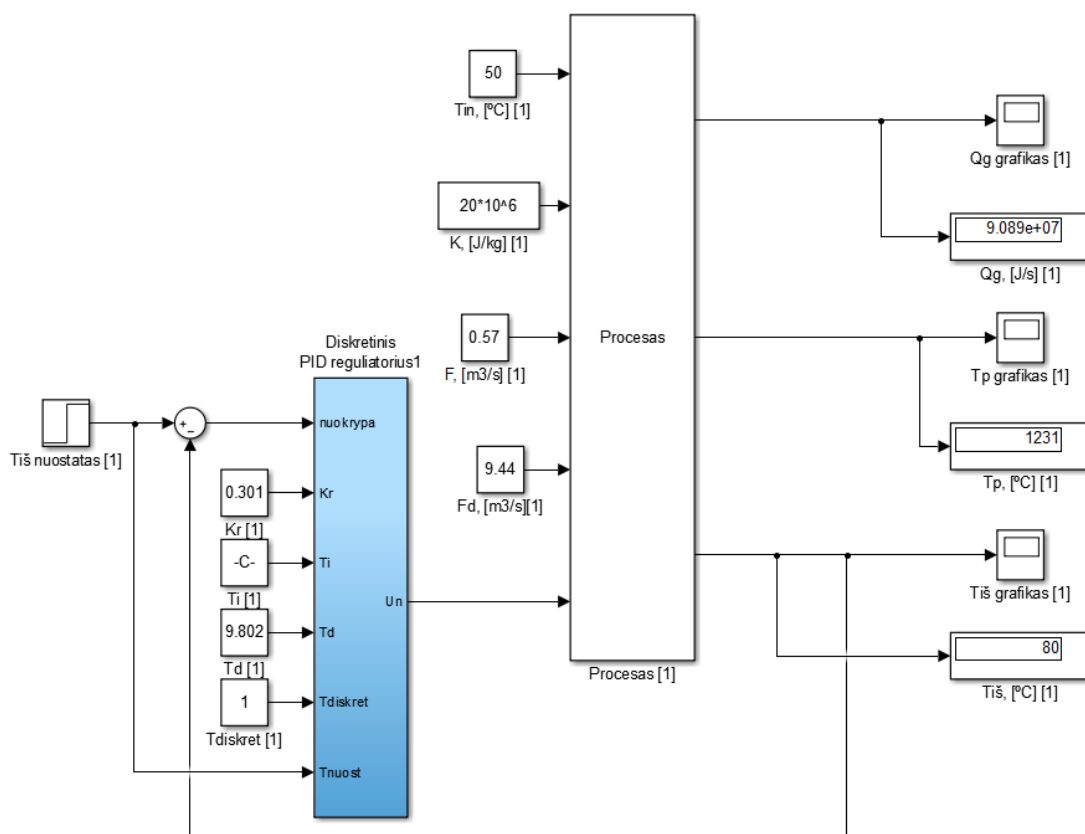
Buvo atliktas eksperimentas, kurio buvo siekiama patikrinti ar teisingai sudaryta lygtis, skirta netiesiogiai apskaičiuoti biokuro kaloringumo vertę. Eksperimento metu buvo šuoliškai pakeista biokuro kaloringumo vertė ir stebima ar sutaps modeliuojama ir netiesiogiai apskaičiuota vertė.

Iš 44 pav. galima padaryti išvadą, kad lygtis sudaryta teisingai. Modeliuojama ir netiesiogiai apskaičiuojama biokuro kaloringumo vertės sutampa.



44 pav. Netiesiogiai apskaičiuoto ir modeliuojamo biokuro kaloringumo verčių palyginimas

Toliau atliekami bandymai, kurių metu į sistemą yra įvedami biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto, pratekančio per vandens šildymo katilą, trikdžiai. Gautieji grafikai yra palyginami su grafikais, gautais taikant vienkontūrę reguliavimo sistemą. Vienkontūrės valdymo sistemos modelio schema pateikiama 45 pav.



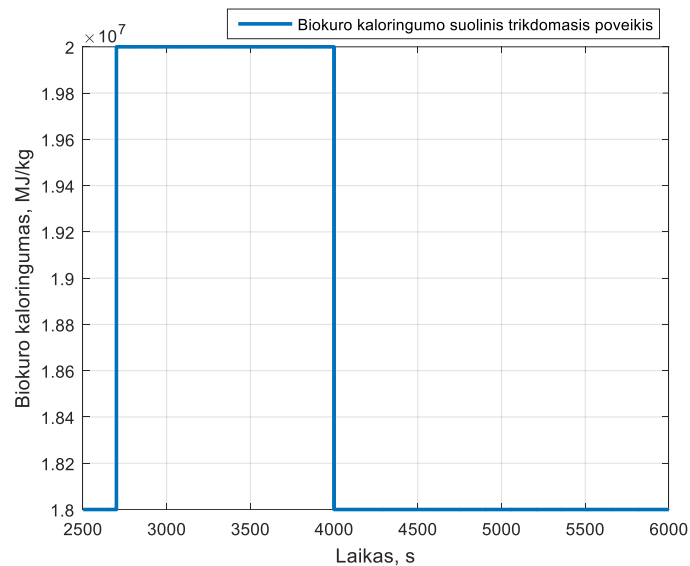
45 pav. Vienkontūrės valdymo sistemos modelis

### 3.4 Adaptyvios valdymo sistemos tyrimas

Atliekant adaptyvios valdymo sistemos tyrimą į sistemą buvo įvedami biokuro kaloringumo ir termofikacinio vandens srauto šuoliniai trikdomieji poveikiai. Gauti rezultatai buvo palyginimai su rezultatais, kurie buvo gauti taikant įprastą vienkontūrę valdymo sistemą su pastoviais reguliatoriaus derinimo parametrais veikimo rezultatais.

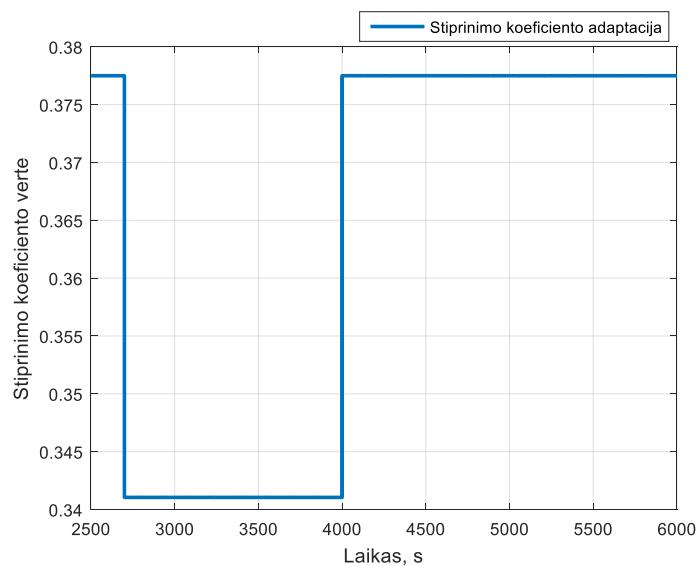
#### 1 bandymas

Atliekant bandymą buvo laikoma, kad pradinė biokuro kaloringumo vertė  $K = 18 MJ$ , biokuro katilo apkrova  $F = 0,37 m^3/s$ . Bandymo metu buvo imituojama, kad pasikeičia biokuro kaloringumo vertė (sistemą paveikia šuoliniai trikdomieji poveikiai). Biokuro kaloringumo šuolinis trikdomasis poveikis pateikiamas 46 pav.



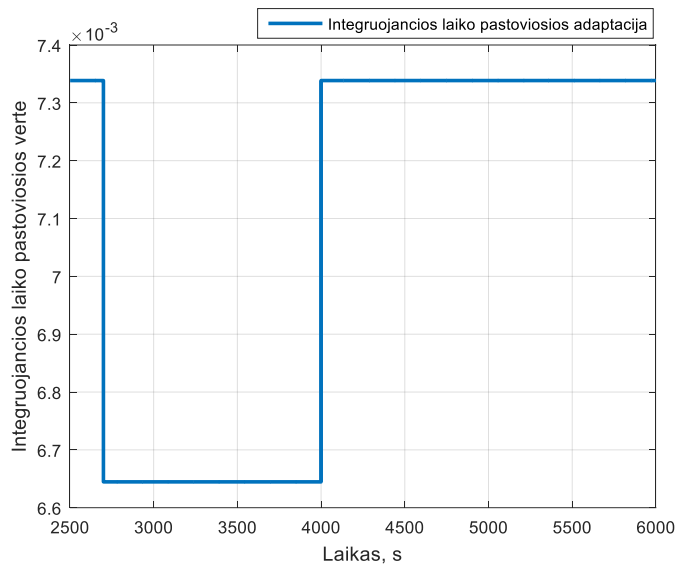
46 pav. Biokuro kaloringumo šuolinis trikdomasis poveikis

PID reguliatoriaus derinimo parametrų adaptacija pateikiama 47 – 49 pav.

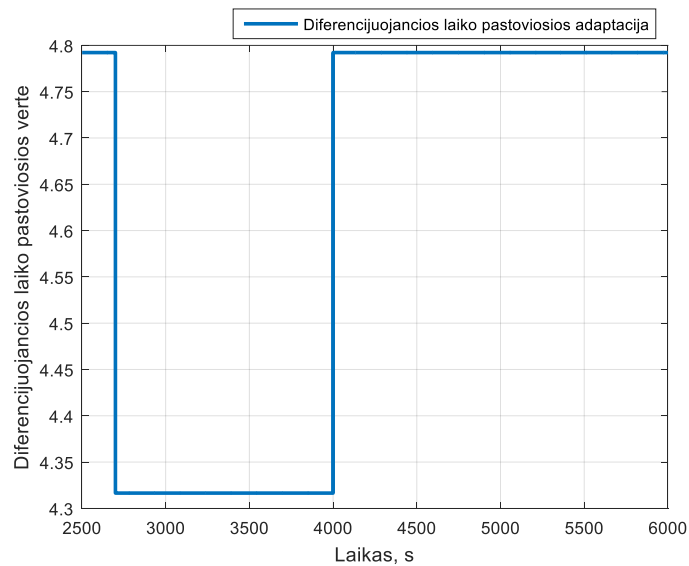




**47 pav.** Stiprinimo koeficiento  $K_r$  kitimas

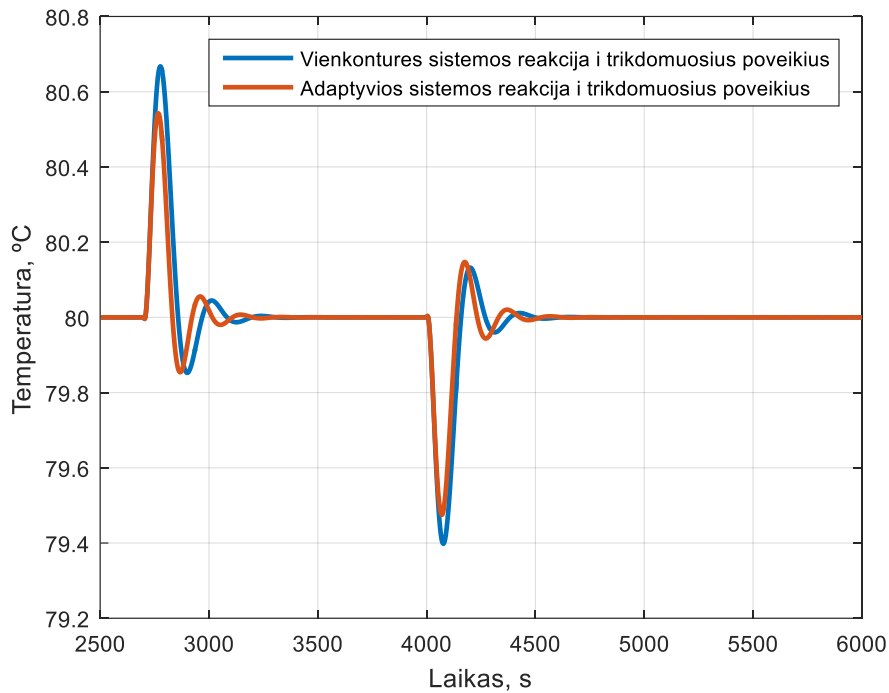


**48 pav.** Integruojancio laiko pastoviosios  $T_i$  kitimas



**49 pav.** Diferencijuojancio laiko pastoviosios  $T_d$  kitimas

Adaptyvios ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo šuolinį trikdymą pateikiama 50 pav.

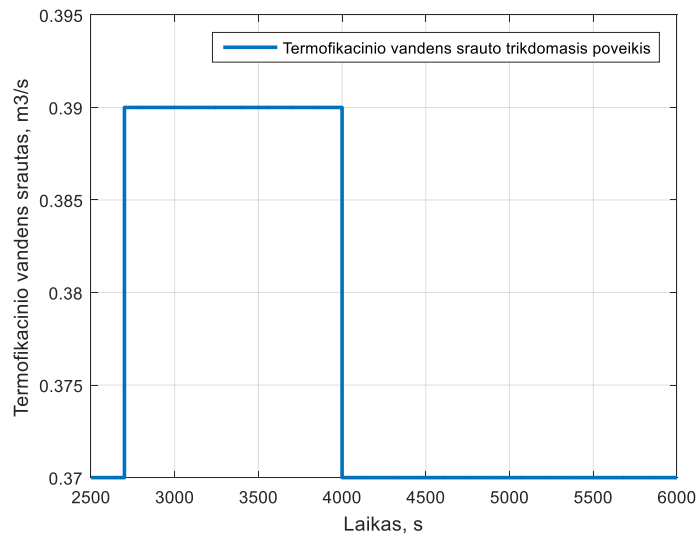


**50 pav.** Adaptyvios ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo trikdomąjį poveikį

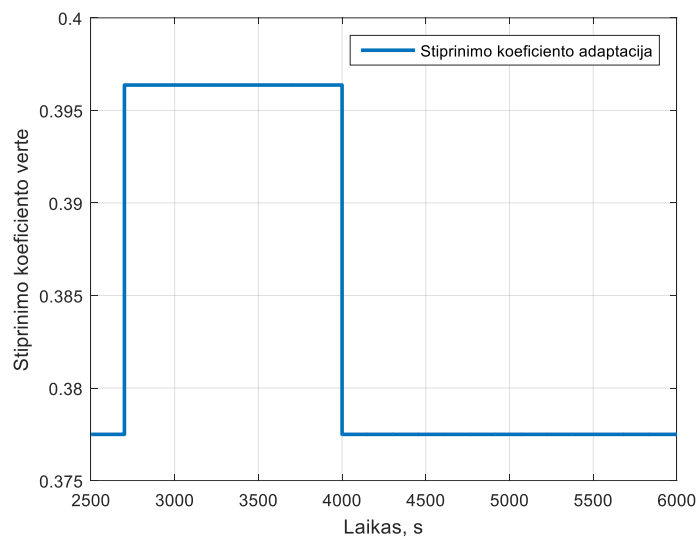
Kokybės rodiklis	Adaptyvi valdymo sistema	Vienkontūrė valdymo sistema
Perreguliavimas $\sigma$ , %	0,54	0,67
Reguliavimo trukmė, s	80,6	107,5

## 2 bandymas

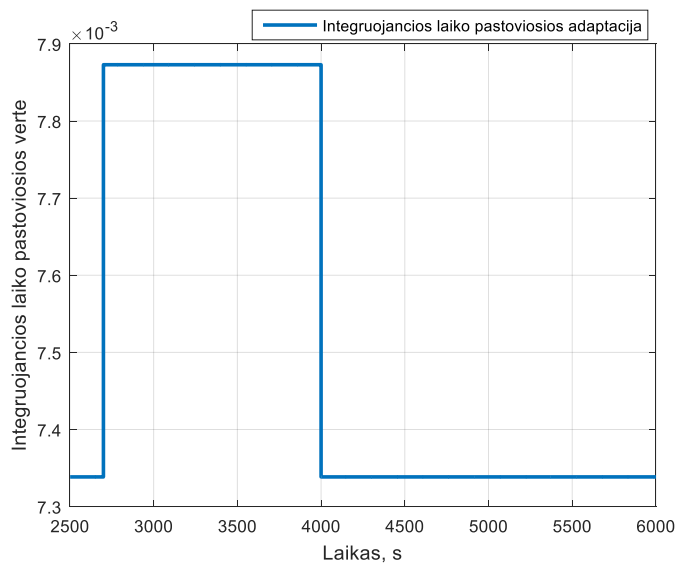
Atliekant bandymą buvo laikoma, kad pradinė biokuro kaloringumo vertė  $K = 18 MJ$ , biokuro katilo apkrova  $F = 0,37 m^3/s$ . Bandymo metu buvo imituojama, kad pasikeičia biokuro katilo apkrovos, pratekančio termofikacinio vandens srauto, vertė (sistemą paveikia šuoliniai trikdomieji poveikiai). Biokuro katilo apkrovos šuolinis trikdomasis poveikis pateikiamas 51 pav.



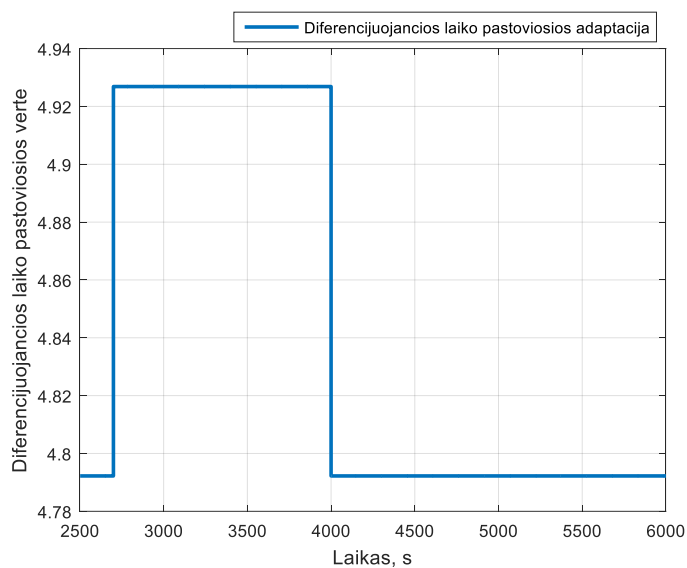
**51 pav.** Biokuro katilo apkrovos šuolinis trikdomasis poveikis  
PID reguliatoriaus derinimo parametrų adaptacija pateikiama 52 – 54 pav.



**52 pav.** Stiprinimo koeficiento  $K_r$  kitimas

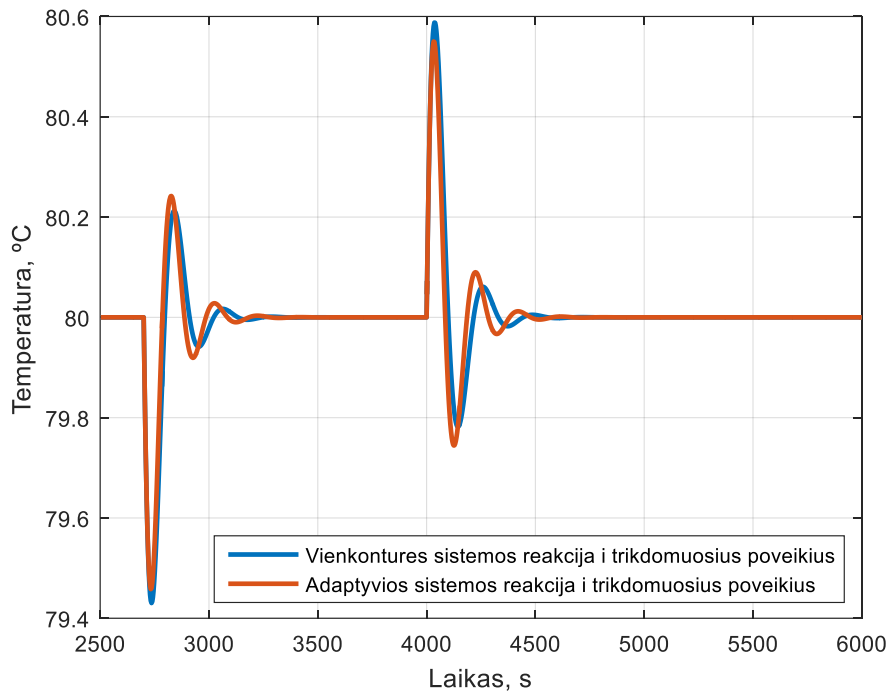


**53 pav.** Integruojancio laiko pastoviosios  $T_i$  kitimas



**54 pav.** Diferencijuojancio laiko pastoviosios  $T_d$  kitimas

Adaptyvios ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo šuolinį trikdymą pateikiama 55 pav.

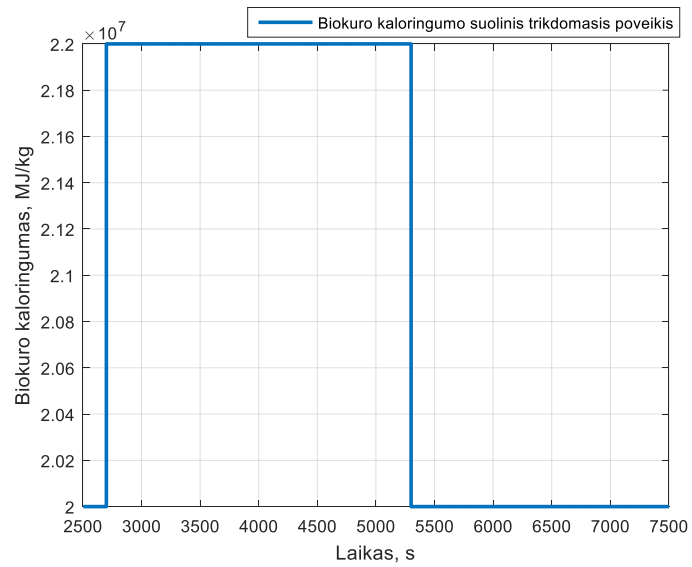


**55 pav.** Adaptivos ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo trikdomąjį poveikį

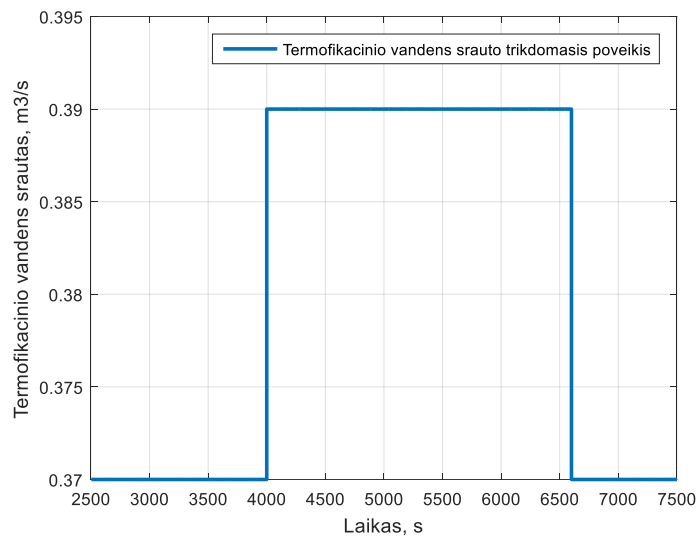
Kokybės rodiklis	Adaptivi valdymo sistema	Vienkontūrė valdymo sistema
Perreguliavimas $\sigma$	0,55	0,59
Reguliavimo trukmė, $s$	45	55,4

### 3 bandymas

Atliekant bandymą buvo laikoma, kad pradinė biokuro kaloringumo vertė  $K = 20 MJ$ , biokuro katilo apkrova  $F = 0,37 m^3/s$ . Bandymo metu buvo imituojama, kad pasikeičia biokuro katilo apkrovos, pratekančio termofikacinio vandens srauto, ir biokuro kaloringumo vertės (sistemą paveikia šoliniai trikdomieji poveikiai). Biokuro katilo apkrovos šolinis trikdomasis poveikis pateikiamas 56 pav., biokuro kaloringumo šolinis trikdomasis poveikis pateikiamas 57 pav.

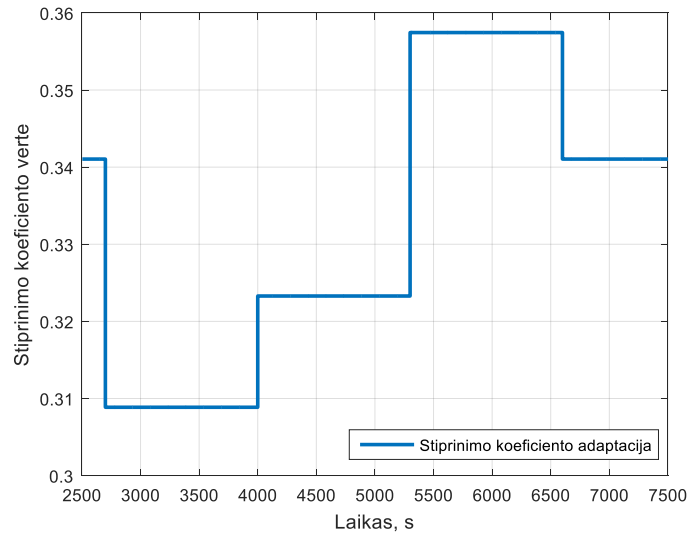


**56 pav.** Biokuro kaloringumo šuolinis trikdomasis poveikis

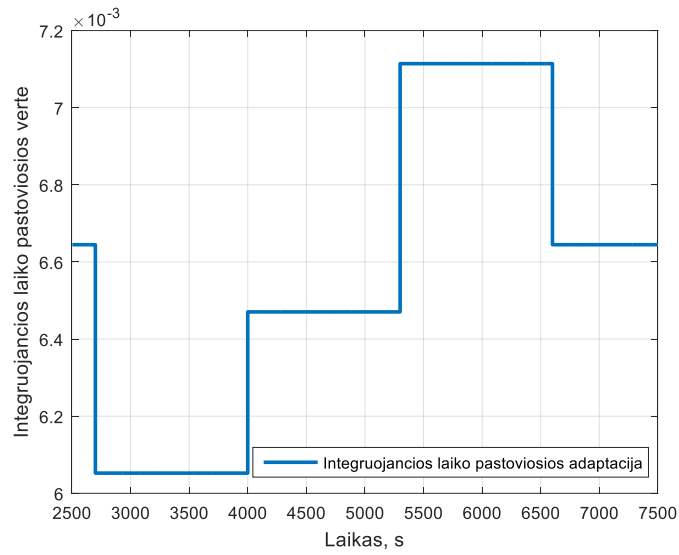


**57 pav.** Biokuro kaloringumo šuolinis trikdomasis poveikis

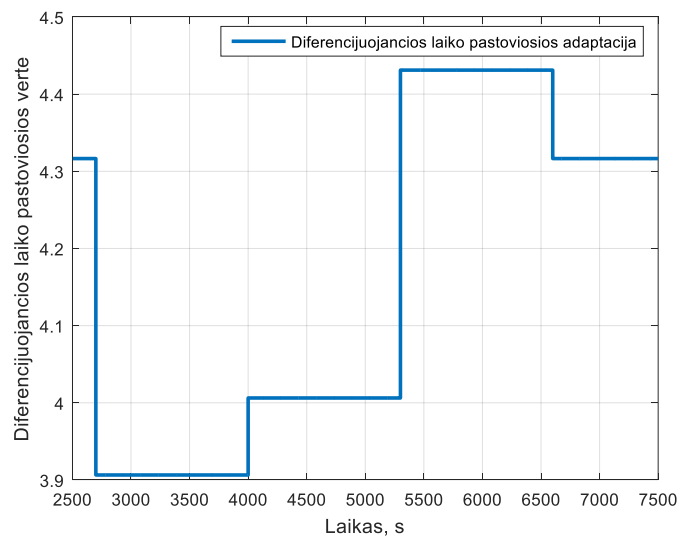
PID reguliatoriaus derinimo parametrų adaptacija pateikiama 57 – 59 pav.



57 pav. Stiprinimo koeficiento  $K_r$  kitimas

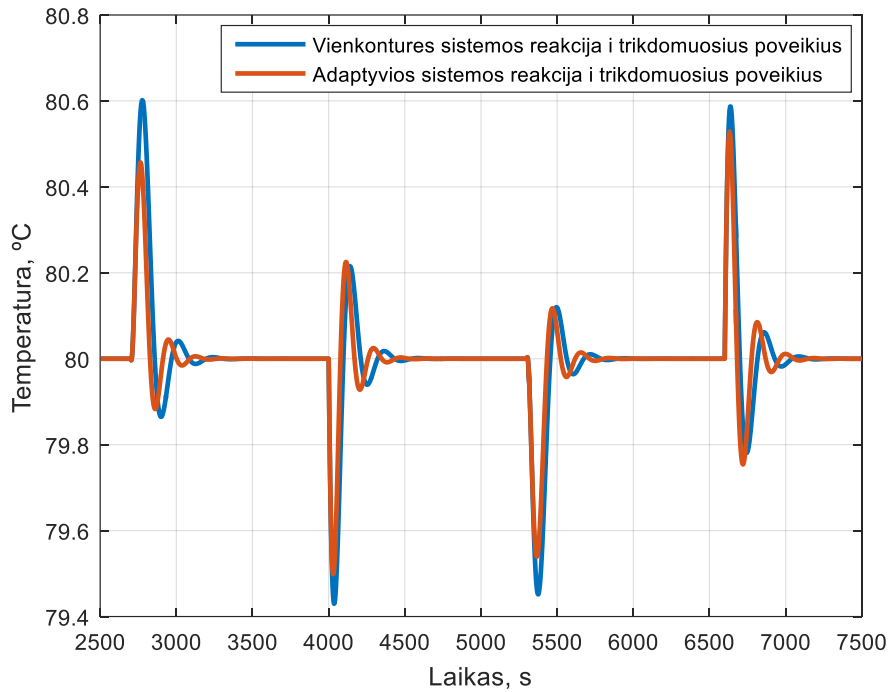


58 pav. Integruojancios laiko pastoviosios  $T_i$  kitimas



**59 pav.** Diferencijuojančios laiko pastoviosios  $T_d$  kitimas

Adaptyvios ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo šulinį trikdomąjį poveikį pateikiama 60 pav.



**60 pav.** Adaptyvios ir vienkontūrės valdymo sistemų reakcija į biokuro kaloringumo trikdomąjį poveikį



## Išvados

1. Sudaryta biokuro katilo temperatūros adaptyvaus valdymo sistema paremta katilo apkrovos ir kuro kaloringumo matavimais realiu laiku.
2. Remiantis proceso dinaminių parametų nustatymu leistinoje technologinių parametų kitimo srityje sudarytas sistemos regulatoriaus adaptacijos algoritmas.
3. Atliktas adaptyvios sistemos veikimo imitacinis modeliavimas plačiame proceso technologinių parametų kitimo diapazone. Adaptyvios valdymo sistemos modeliavimo rezultatai palyginti su įprastos vienkontūrės valdymo sistemos veikimo modeliavimo rezultatais.
4. Valdymo sistemos tyrimas parodė, kad adaptyvaus valdymo sistemoje pasiekiami geresni pereinamųjų procesų kokybės rodikliai (dinaminė nuokrypa ir pereinamojo proceso trukmė) visose modeliavimo eksperimentuose. Į sistemą įvedus biokuro kaloringumo trikdомуosius poveikius dinaminė nuokrypa sumažėjo 19 %, pereinamojo proceso trukmė – 25 %. Į sistemą įvedus biokuro katilo apkrovos trikdомуosius poveikius dinaminė nuokrypa sumažėjo 6 %, pereinamojo proceso trukmė – 18 %.
5. Ištirta adaptyvaus valdymo sistema rekomenduojama taikyti biokuro katilų valdymui kai biokuro kaloringumas ir katilo apkrova gali keistis plačiuose diapazonuose.

## Literatūros sąrašas

1. Vytautas Aleksa, Vytautas Galvanauskas. *Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas*. Kaunas: Technologija, 2008. 284 p. Žr. 11 – 15 p. [Žiūrėta 2016-05-24].
2. Lietuvos Respublikos ūkio ministerija. *Slėginių įrenginių techninis reglamentas*. Vilnius: 2000. [Žiūrėta 2016-05-25].
3. Vitas Lazarenka. *Kietojo biokuro katilinės bandymų režiminis tyrimas*. Akademija: Aleksandro Stulginskio Universitetas, 2013. 58 p. Žr. 16, 20 p. [Žiūrėta 2016–05-24]. Prieiga per internetą: [http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2013~D\\_20130621\\_141745-61895/DS.005.0.01.ETD](http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2013~D_20130621_141745-61895/DS.005.0.01.ETD).
4. UAB „SSPC“. *Katilinės įrenginių žiniaraštis (110484S0LB-TP-TŠ.Ž-8)*. Kaunas, 2012. [Žiūrėta 2016-05-26].
5. UAB „SSPC“. *Katilinės aiškinamasis raštas (110484S0LB-TP-TŠ.AR-2)*. Kaunas, 2012. [Žiūrėta 2016-05-26].
6. Mindaugas Jakubčionis. *Šiluminės technikos pagrindai*. Kaunas: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2011. 204 p. Žr. 164 p. [Žiūrėta 2016–05-25].
7. Justen Energitechnik A/S. *Vandeniui aušinamas ardynas*. [Žiūrėta 2016-05-25]. Prieiga per internetą: <http://newheat.lt/images/files/Ardyno%20aprasymas.pdf>.
8. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste, Tõnu Pihu, Sulev Soosaar. *Biokuro naudotojo žinynas*. Vilnius: 2007. 165 p. Žr. 17 p. [Žiūrėta 2016-05-24].
9. Petras Švenčianas. *Kuro degimo teorijos pagrindai*. Kaunas: Technologija, 2003. 103p. Žr. 6, 13 p. [Žiūrėta 2016-05-24].
10. Arvydas Galinis, Inga Konstantinavičiūtė, Egidijus Norvaiša, Dalius Tarvydas, Vidas Lekavičius, Irena Alėbaitė. *Kietojo biokuro apskaitos energijos gamybos šaltiniuose taisyklės*. Kaunas: 2011. 70 p. Žr. 16 – 17 p. [Žiūrėta 2016-05-24].
11. H. Pirinen. Guide on chopped wood for one – family houses. TTS – Institute, 1997. [Žiūrėta 2016-05-24].
12. S. Lisauskas. *Automatinio valdymo teorija*. Vilnius: Technika, 2012. 110 p. Žr. 6 p. [Žiūrėta 2016-06-16].
13. D. Levišauskas. *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 119 p. Žr. 72-77 p. [Žiūrėta 2016-06-16].
14. Chapman, Stephen J. *MATLAB Programming for Engineers*. 3rd ed. Toronto: Thompson, 2005.

15. Petrovas, Andrius. *Šiuolaikinės Automatinio Valdymo Sistemos: Mokomoji Knyga*. Vilnius: TEV, 2012.
16. Hee Jin Kwak, Su Whan Sung, and In-Beum L. On-Line Process Identification and Autotuning for Integrating Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, vol. 36, 5329-5338.